INVESTIGAREA GĂURILOR DE SONDE PRIN METODE GEOFIZICE

Fl. Gheorghiu

EDITURA TEHNICĂ

INVESTIGAREA
GĂURILOR DE SONDE
PRIN METODE
GEOFIZICE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

INVESTIGAREA GĂURILOR DE SONDE PRIN METODE GEOFIZICE

Ing. Fl. Gheorghiu

213689
B.C.U. - IASI

Editura tehnică

București — 1969

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CUPRINS

Introducere 11

Cap. I. **Bazele interpretării cantitative a diagrafiilor** 17
1. Porozitatea, saturaţia şi permeabilitatea 17
2. Rezistivitatea şi conductivitatea rocilor 18
3. Raza de investigare 32

Cap. II. **Potenţialul spontan, potenţialul provocat şi potenţialul gradient** 34
1. Potenţialul spontan (PS) 34
1.1. Fundamentarea fizico-matematică şi geologică a naturii potenţialului spontan 34
1.2. Schema principială de înregistrare 46
1.3. Interpretarea calitativă 47
1.4. Determinarea rezistivităţii apei de zăcământ după profile PS..... 59
1.5. Domeniul de aplicabilitate 65
2. Metoda potenţialelor provocate ale rocilor 65
3. Metoda potenţialului gradient 67

Cap. III. **Diagrafii clasice de rezistivitate** 69
1. Principiul determinării rezistivităţii aparente prin diagrafiile clasice de rezistivitate 69
2. Dispozitivul potenţial (normal) 70
3. Dispozitivul gradient (lateral) 72
4. Curbe caracteristice 73
4.1. Curbe caracteristice pentru strate rezistive 74
4.2. Curbe caracteristice pentru strate conductive 76
4.3. Curbe caracteristice pentru strate foarte rezistente 78
5. Variante ale metodei electrice clasice 79
5.1. Varianta P-2N-L 80
5.2. Varianta P-2N-NL 83
5.3. Varianta P-NL 84
6. Domeniul de aplicabilitate a diagrafiilor clasice de rezistivitate 86
7. Diagrafia electrică laterală pentru roci carbonate 87
7.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură 87
7.2. Interpretarea calitativă 88
7.3. Domeniul de aplicabilitate 89

Cap. IV. **Microcarotajul** 91
1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură 91
2. Interpretarea calitativă 94
2.1. Strate permeabile şi poroase 94
2.2. Argile şi marne 97
2.3. Formaţiuni cu caverne 97

2.4. Formaţiuni compacte impermeabile 98
2.5. Factorii care denaturează formele curbelor de microcarotaj 99
3. Interpretarea cantitativă 99
3.1. Determinarea rezistivităţii zonei spălate 99
3.2. Determinarea factorului de rezistivitate a formaţiunii şi a rezistivităţii 102
4. Domeniul de apicabilitate 104

Cap. V. **Diagrafii laterolog** 105
1. Laterolog-3 105
1.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură .. 105
1.2. Interpretarea calitativă 109
1.3. Determinarea rezistivităţii reale 115
1.4. Domeniul de aplicabilitate 120
2. Laterolog-7 121
2.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură .. 121
2.2. Interpretarea calitativă 126
2.3. Determinarea rezistivităţii reale 127
2.4. Domeniul de aplicabilitate 128
3. Laterolog-8 129
3.1. Principiul metodei 129
3.2. Determinarea rezistivităţii reale 130

Cap. VI. **Microlaterolog şi proximitilog** 131
1. Microlaterologul 131
1.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură .. 131
1.2. Interpretarea calitativă 133
1.3. Interpretarea cantitativă 135
1.4. Domeniul de aplicabilitate 135
2. Proximitilogul 135
2.1. Dispozitivul de măsură 137
2.2. Interpretarea calitativă 137
2.3. Determinarea rezistivităţii reale a zonei spălate 139
2.4. Domeniul de aplicabilitate 139

Cap. VII. **Diagrafia inductivă** 140
1. Principiul metodei, dispozitive şi schema principială de măsură 140
2. Scara de înregistrare 143
3. Factorii geometrici şi efectul pelicular 143
4. Interpretarea calitativă 146
4.1. Definirea stratelor şi determinarea limitelor lor 146
4.2. Influenţa rezistivităţii noroiului şi a diametrului găurii sondei 147
4.3. Influenţa rezistivităţii stratului 148
4.4. Influenţa stratelor adiacente şi a grosimii stratului 148
4.5. Efectul invaziei 150
5. Determinarea rezistivităţii reale şi a saturaţiei 152
6. Domeniul de aplicabilitate 154

Cap. VIII. **Fundamentarea fizică a diagrafiilor radioactive** 156
1. Caracteristicile principale ale nuclizilor 156
2. Radioactivitatea 157
3. Legile dezintegrării radioactive 158
4. Dezintegrări succesive 159

5. Fluctuaţiile statistice ale dezintegrării 159
6. Reacţii nucleare 160
7. Interacţiunea radiaţiilor cu substanţa 162
7.1. Interacţiunea radiaţiilor gama cu substanţa 162
7.2. Interacţiunea neutronilor cu substanţa 164
8. Metrologia radiaţiilor 167
8.1. Traductoare pentru radiaţii gama 167
8.2. Traductoare pentru neutroni 170

Cap. IX. **Diagrafia radioactivităţii naturale şi diagrafia trasorilor radioactivi** 172
1. Diagrafia radioactivităţii naturale sau diagrafia gama-natural 172
1.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură .. 172
1.2. Interpretarea calitativă 176
1.3. Determinarea radioactivităţii naturale reale 182
1.4. Domeniul de aplicabilitate 182
2. Diagrafia trasorilor radioactivi 183

Cap. X. **Diagrafii neutronice** 187
1. Diagrafia neutron-gama 187
1.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură .. 187
1.2. Interpretarea calitativă 189
1.3. Determinarea porozităţii 193
1.4. Domeniul de aplicabilitate 194
2. Diagrafia neutron-neutron lenţi 194
2.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură .. 195
2.2. Interpretarea calitativă 196
2.3. Determinarea porozităţii după diagrafia neutron-neutron lenţi 197
2.4. Domeniul de aplicabilitate 200
3. Alte diagrafii neutronice 200
3.1. Diagrafia clorului 200
3.2. Diagrafii ale timpului de viaţă a neutronilor 203
3.3. Diagrafii prin activare cu neutroni 207
3.4. Diagrafii ale rezonanţei nucleare 209
3.4.1. Diagrafia rezonanţei neutronice 209
3.4.2. Diagrafia fluorescenţei datorată rezonanţei gama 210

Cap. XI. **Diagrafii gama** 212
1. Diagrafia gama-gama 212
1.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură .. 212
1.2. Interpretarea calitativă 214
1.3. Determinarea porozităţii rocilor 217
1.4. Domeniul de aplicabilitate 219
2. Diagrafia gama-gama selectiv 219
3. Diagrafia gama-neutron 220
4. Diagrafii obţinute cu radiaţii X 220
4.1. Diagrafia fluorescenţei X 221
4.2. Diagrafia difuziei X 222
4.3. Diagrafia difracţiei X 223

Cap. XII. **Diagrafii sonice, parametrii semnalului acustic, cimentometria şi diagrafia micro-seismosonică** 224
1. Diagrafii sonice 224
1.1. Natura semnalelor acustice 225

1.2. Principiul metodei, dispozitive și scheme principiale de măsură 227
1.3. Interpretarea calitativă ... 234
1.3.1. Diagrafia sonică de timp obișnuită ... 234
1.3.2. Diagrafia sonică de timp integrată în funcție de adîncime ... 236
1.3.3. Diagrafia sonică de timp Δt ... 236
1.3.4. Factorii care influențează diagrafiile sonice ... 238
1.4. Determinarea porozității ... 246
1.4.1. Determinarea porozității formațiunilor consolidate ... 247
1.4.2. Determinarea porozității formațiunilor semiconsolidate ... 249
1.4.3. Determinarea porozității formațiunilor neconsolidate ... 250
1.5. Determinarea rezistivității apei formațiunilor saturate 100% cu apă de zăcămînt ... 250
1.6. Metoda pentru aprecierea dacă un strat este petrolifer prin studierea raportul F_r/F_s ... 251
1.7. Domeniul de aplicabilitate a diagrafiilor sonice ... 251
2. Parametrii semnalului acustic ... 252
2.1. Factorii care alterează semnalul acustic ... 252
2.2. Alterarea undelor longitudinale și transversale pe parcursul generator-receptor ... 254
2.3. Studiul parametrilor acustici ... 259
3. Diagrafii pentru controlul cimentării ... 259
4. Diagrafii micro-seismosonică ... 265

Cap. XIII. **Diagrafia rezonanței magnetice nucleare** ... 268
1. Principiul metodei, dispozitivul și schema principială de măsură ... 268
2. Interpretarea ... 273
3. Domeniul de aplicabilitate ... 274

Cap. XIV. **Diagrafii obținute prin măsurarea intensității curentului electric** 276
1. Principiul metodelor folosind dispozitive cu electrozi necranați ... 276
1.1. Dispozitive și scheme de măsură ... 277
1.2. Domeniul de aplicabilitate ... 280
2. Principiul metodei folosind dispozitive cu electrozi ecranați ... 280
2.1. Dispozitive și scheme de măsură ... 281
2.2. Domeniul de aplicabilitate ... 282

Cap. XV. **Termometria, cavernometria și pandajmetria** ... 283
1. Termometria ... 283
1.1. Proprietățile termice ale rocilor ... 283
1.2. Cîmpuri termice ... 285
1.3. Aparatura folosită pentru măsurarea temperaturilor în sonde ... 293
1.3.1. Electrometre care înregistrează gradientul geotermic ... 293
1.3.2. Electrometre diferențiale ... 297
1.3.3. Termometrul maximal ... 297
1.4. Interpretarea termogramelor ... 299
1.5. Domeniul de aplicabilitate ... 302
2. Cavernometria ... 304
3. Pandajmetria ... 304

Cap. XVI. **Determinarea porozității rocilor prin metode combinate. Saturația, permeabilitatea, hidrocarburi reziduale, presiuni anormale. Roci argiloase. Programe de investigare geofizică** ... 312
1. Determinarea porozității rocilor prin metode combinate ... 312
1.1. Determinarea litologiei porozității rocilor după diagrafii sonice și neutronice ... 315

1.2. Determinarea litologiei și porozității rocilor după diagrafii neutronice și gama-gama 319
1.3. Determinarea litologiei și porozității rocilor după diagrafii sonice și gama-gama 321
1.4. Determinarea porozității reale a formațiunilor gazeifere 323
1.5. Determinarea porozității vacuolare 327
2. Determinarea saturației rocilor 328
2.1. Determinarea saturației formațiunilor curate umectate cu apă 329
2.1.1. Determinarea datelor necesare calculării saturației în apă a rocilor 329
2.1.2. Metode de calculare a saturației în apă 331
2.2. Determinarea saturației formațiunilor curate umectate cu petrol 346
2.3. Determinarea saturației formațiunilor cu porozitate vacuolară sau de fracturi 348
2.3.1. Determinarea saturației formațiunilor la care vacuolele comunică între ele 352
2.3.2. Determinarea saturației formațiunilor la care vacuolele nu comunică între ele. 355
3. Permeabilitatea 357
4. Saturația în hidrocarburi reziduale 359
5. Presiuni anormale 360
6. Determinarea porozității și saturației rocilor argiloase 362
6.1. Determinarea porozității și conținutului în argile 363
6.1.1. Metode pentru determinarea porozității și conținutului în argile utilizînd diagrafii de rezistivitate aparentă 363
6.1.2. Metode pentru determinarea porozității și conținutului în argile utilizînd diagrafii nucleare și sonice. 367
6.2. Determinarea saturației rocilor argiloase 370
7. Programe de investigare geofizică a găurilor de sondă 376

Cap. XVII. **Interpretarea diagrafiilor cu mașini electronice** 389
1. Înregistrarea pe bandă perforată 389
2. Înregistrarea pe bandă magnetică 391
3. Exemple de interpretare 392

BCU IASI / CENTRU

INTRODUCERE

Geofizica generală și geofizica aplicată. Geofizica generală sau fizica globului are ca obiect de studiu, în sens larg, proprietățile fizice ale Pămîntului și fenomenele fizice ce se desfășoară în interiorul, la suprafața și la exteriorul lui. În felul acesta, geofizica generală cuprinde atît fizica Pămîntului solid (sau geofizica în sens restrîns), cît și hidrofizica și aerofizica.

Ca orice activitate de cercetare științifică fundamentală, geofizica își are domeniul său aplicativ. În legătură cu dezvoltarea geofizicii, ca știință, a apărut geofizica aplicată, care folosește, sub diverse aspecte, cunoștințele geofizice în scopuri practice.

Metodele de cercetare ale geofizicii generale și ale geofizicii aplicate sînt în linii generale asemănătoare, fiind fundamentate pe baze fizico matematice și geologice.

Deosebirea dintre geofizica generală și cea aplicată se referă mai mult la natura scopurilor urmărite; ca atare, nu poate exista o distincție netă între aceste două ramuri ale geofizicii. Geofizica, în sens restrîns, urmărește cunoașterea proprietăților fizice ale Pămîntului și studierea fenomenelor terestre, iar geofizica aplicată furnizează date cantitative sau calitative privind natura formațiunilor geologice pentru cercetarea substanțelor minerale utile.

Disciplinele din cadrul geofizicii aplicate. Geofizica aplicată studiază, prin diverse procedee fizice, structura scoarței terestre pe o profunzime de cîțiva kilometri. În funcție de procedeele folosite, în cadrul geofizicii aplicate se disting două discipline și anume *prospecțiunile geofizice* și *geofizica de sondă*.

În sens larg, deosebirea dintre procedeele prospecțiunilor geofizice și cele ale geofizicii de sondă constă în aceea că în cazul prospecțiunilor geofizice se execută investigări asupra scoarței Pămîntului (pînă la profunzimi de ordinul kilometrilor) cuprinzînd volume imense

de roci, pe cînd investigările făcute prin metodele geofizicii de sondă cuprind un volum restrîns de roci, din jurul găurii de sondă.

Domeniul şi obiectul geofizicii de sondă. Geofizica de sondă cuprinde complexul diagrafiilor efectuate în găuri de sonde, în scopul de a stabili profilul geologic, de a determina poziţia şi adîncimea stratelor traversate de foraje şi de a stabili conţinutul în substanţe minerale utile fluide sau solide ale acestora.

În cadrul preocupărilor geofizicii de sondă se includ şi lucrările de control a stării tehnice a găurilor de sondă, atît în timpul procesului de foraj cît şi în perioada de extracţie (acest gen de lucrări nu vor fi expuse în această lucrare).

După datele diagrafiilor* se pot face interpretări calitative şi cantitative asupra formaţiunilor traversate de foraje.

Prin interpretarea calitativă a diagrafiilor se stabilesc natura formaţiunilor (se deosebesc argilele de rocile permeabile sau dure), grosimea, succesiunea şi adîncimea stratelor; prin corelarea diagrafiilor înregistrate în mai multe sonde se pot întocmi hărţi cu izopachite sau cu izobate şi se pot stabili eventuale falii.

Prin interpretarea cantitativă a diagrafiilor se pot determina porozitatea şi saturaţia în apă sau în hidrocarburi a formaţiunilor din zona necontaminată, porozitatea şi saturaţia în hidrocarburi reziduale a formaţiunilor din zona invadată cu filtratul separat din noroiul de foraj, procentul de petrol ce se poate recupera dintr-o formaţiune; în cazuri favorabile se pot determina permeabilitatea formaţiunilor, zonele cu presiuni anormale şi presiunea fluidelor din formaţiuni.

Clasificarea metodelor geofizicii de sondă. Metodele geofizicii de sondă pot fi clasificate după tipul interacţiunii [1] şi după parametrul fizic măsurat. Se deosebesc următoarele interacţiuni: interacţiuni forte, interacţiuni electromagnetice, interacţiuni elastice.

Interacţiunile forte nu sînt utilizate în investigarea găurilor de sondă întrucît au o forţă portantă de informaţii redusă.

Interacţiunile electromagnetice sînt cele mai des utilizate în geofizica de sondă deoarece au loc la mare distanţă, ele fiind rezultatul unui

* Se numeşte *diagrafie* înregistrarea sub formă de diagramă a unui parametru variabil al formaţiunilor traversate de foraje în funcţie de adîncime

cîmp vectorial în care cuanta este fotonul. Această cuantă are spinul 1, masa în repaus fiind nulă; de aici marea portanță a acestor interacțiuni.

Diagrafiile care au la bază interacțiuni electromagnetice se clasifică după cum urmează:

a) diagrafii utilizînd curent pulsatoriu de foarte joasă frecvență (0—400 Hz); acestea sînt diagrafiile de rezistivitate clasice;

b) diagrafii utilizînd curent de frecvență joasă (400 Hz—10 kHz); acestea sînt diagrafii ale rezonanței magnetice nucleare a protonului (aprox. 2 kHz);

c) diagrafii utilizînd curent de frecvență medie (10—100 kHz); acestea sînt diagrafiile inductive (20 kHz);

d) diagrafii utilizînd curent de frecvență înaltă (100 kHz—100 MHz). În prezent, aceste diagrafii sînt folosite doar sporadic, pentru măsurarea constantei dielectrice prin inducție (10 MHz), metodă concepută de D.S. Daev (constanta dielectrică este de 2,5 pentru petrol și 80 pentru apă).

e) diagrafii utilizînd unde luminoase. Deoarece propagarea undelor luminoase prin fluidele din gaura de sondă se face dificil sau chiar de loc, astfel de diagrafii sînt sporadic folosite (de exemplu obținerea diagrafiilor prin intermediul televizoarelor sau al aparatelor de fotografiat).

f) diagrafii utilizînd radiații X (10—100 keV). Asemenea diagrafii sînt practic neutilizate din cauza slabei puteri de pătrundere a radiațiilor X;

g) diagrafii bazate pe radioactivitatea naturală a rocilor (0,1—3 MeV). Acest gen de diagrafii au căpătat o largă răspîndire.

h) diagrafii bazate pe radioactivitatea artificială (3—10 MeV). Din categoria acestui gen de diagrafii se disting: diagrafia neutron-gama, neutron-neutron, gama-gama, activarea cu neutroni, efectul Mössbauer etc.

Interacțiuni elastice. Din interacțiunile elastice se folosesc în geofizica de sondă numai acelea care au o frecvență ultrasonică (20—30 kHz) (diagrafii sonice).

Clasificarea metodelor după *parametrul fizic* măsurat al rocilor este cea mai frecvent folosită.

Pentru simplificarea în descriere s-au grupat metodele care au la bază același parametru fizic măsurat, astfel: metode bazate pe măsurarea rezistivității sau conductivității aparente a rocilor (diagrafii de rezistivitate clasice, micro-carotaj, laterolog, microlaterolog, inductiv); metode bazate pe măsurarea potențialelor (diagrafia potențialului natural, gradientului de potențial, potențialelor provocate); metode radioactive (diagrafia gama natural, diagrafii neutronice diverse, diagrafia gama-gama, diagrafii de rezonanță nucleară și altele); metode sonice; metode ale rezonanței magnetice nucleare; metode termice; magnetice.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY

NOTAȚII

Pentru a evita explicarea după fiecare formulă, prezentăm semnificațiile notațiilor utilizate în lucrare.

Adîncimea totală a sondei	H
Conductivitate	C
Concentrație	c
Concentrația în săruri a apei de zăcămînt	c_w
Concentrația în săruri a fluidului	c_f
Diametrul zonei invadate	d_{zi}
Diametrul zonei spălate	d_{xo}
Diametrul găurii sondei	d
Densitatea globală	δ_g
Densitatea matricei	δ_m
Densitatea fluidului	δ_f
Exponentul porozității	m
Exponentul saturației	n
Factorul de rezistivitate al formațiunii	F
Factorul aparent de rezistivitate al formațiunii	F_a
Factorul mineralogic	F_m
Factorul de rezistivitate al argilei	F_{arg}
Grosimea stratului	h
Grosimea turtei de noroi	h_{tn}
Indicele de rezistivitate	I_ρ
Intervalul de timp pentru propagarea semnalelor sonice în formațiuni	Δt
Idem în fluide	Δt_f
Idem în matricea rocii	Δt_m
Lungimea dispozitivului gradient	L_g
Lungimea dispozitivului potențial	L_p
Lungimea dispozitivului sonic	L_s
Lungimea dispozitivului laterolog-3	L_{LL3}
Lungimea dispozitivului gama	L_γ
Lungimea dispozitivului gama-gama	$L_{\gamma\gamma}$
Lungimea dispozitivului neutron-gama	$L_{n\gamma}$
Lungimea dispozitivului neutron-neutron	L_{nn}
Lungimea dispozitivului inductiv	L_{IL}
Lungimea de undă	λ
Permeabilitatea	k
Perioada	T
Porozitatea efectivă	$\varnothing$
Porozitatea totală	$\varnothing_t$
Porozitatea utilă	$\varnothing_u$
Porozitatea după investigări sonice	$\varnothing_s$
Porozitatea după investigări de densitate	$\varnothing\delta$
Porozitatea după investigări neutronice	$\varnothing_n$
Potențialul spontan	PS
Potențialul static	PS_{st}
Potențialul pseudostatic	PS_{pseudo}
Potențialul de difuzie	E_d
Potențialul de adsorbție (membrană)	E_a
Potențialul de difuzie-adsorbție	E_{da}
Potențialul de filtrare	E_f
Rezistivitatea	ρ
Rezistivitatea aparentă a stratului	ρ_A
Rezistivitatea aparentă a apei cînd nu se specifică felul ei	ρ_a
Rezistivitatea reală a stratului (a zonei necontaminate)	ρ_r
Rezistivitatea noroiului	ρ_n
Rezistivitatea filtratului	ρ_f

BIBLIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITARĂ

Rezistivitatea zonei invadate	ρ_{zt}
Rezistivitatea zonei spălate	ρ_{x0}
Rezistivitatea apei de zăcământ	ρ_w
Rezistivitatea formațiunii saturată 100 % cu apă de zăcământ	ρ_0
Rezistivitatea stratelor adiacente	ρ_{ad}
Rezistivitatea rocii ce conține petrol sau gaze	ρ_H
Rezistivitatea aparentă măsurată cu dispozitiv laterolog-3	ρ_{LL_3}
Idem la care s-a făcut corecția pentru grosimea stratului	$\rho_{LL_3}(h)$
Rezistivitatea aparentă măsurată cu dispozitiv inductiv	ρ_{IL}
Idem la care s-a făcut corecția pentru grosimea stratului	$\rho_{IL}(h)$
Rezistivitatea aparentă măsurată cu dispozitiv microtaterolog	ρ_{MIL}
Rezistivitatea aparentă măsurată cu dispozitiv normal 16″	ρ_{16}''
Idem dispozitiv normal 64″	ρ_{64}''
Idem dispozitiv lateral 18′	ρ_{18}'
Rezistivitatea aparentă măsurată cu dispozitive gradiente	ρ_g
Saturația în hidrocarburi din zona necontaminată	S_H
Saturația în hidrocarburi reziduale din zona spălată	S_{Hr}
Saturație în apă din zona invadată	S_{zt}
Saturația în apă din zona spălată	S_{x0}
Saturația în apă din zona necontaminată	S_w
Timpul	t
Temperatura	T
Viscozitatea	η
Volum	V
Volumul gazelor	V_g
Volumul apei	V_w
Volumul hidrocarburilor	V_H
Volumul total al porilor	V_{tp}
Volumul rocii	V_r
Viteza	v
Viteza undelor longitudinale	v_l
Viteza undelor transversale	v_t
Viteza semnalelor sonice prin formațiune	v_{form}
Idem, prin noroi	v_n
Idem, prin matricea rocii	v_m

BIBLIOGRAFIE

1. Desbrandes, R. **Perspectives d'avenir des diagraphies.** Revue de l'Inst. Français du pétrole, nr. 6, 1967, pp. 935—943
2. Vilmaz, M. **Introduction to the theory of rezistivity and the principles of modern physics.** Blaisdell Pub. Co., New-York, 1965
3. Daev, D. S. **Diagraphies dielectrique par induction.** Iz. Vys. us. Geol. i. Razv. 1965, febr. 1967

BCU IAȘI CENTRALA UNIVERSITARĂ LIBRARY

CAPITOLUL I

BAZELE INTERPRETĂRII CANTITATIVE A DIAGRAFIILOR

1. POROZITATEA, SATURAȚIA ȘI PERMEABILITATEA

Porozitatea. Proprietatea unui corp solid de a avea pori în masa sa se numește *porozitate.* Ținînd seama de faptul că golurile existente în roci pot comunica între ele sau pot fi izolate (fără comunicație între ele), porozitatea poate fi de două feluri și anume: 1) porozitate totală (fizică) $\varnothing_t$, dacă se iau în considerație toate golurile din rocă, indiferent de forma, mărimea și secțiunea lor; 2) porozitate efectivă (relativă) $\varnothing$, în care se include numai volumul acelor goluri care comunică între ele și prin care circulă un fluid oarecare [1, 2].

Porozitatea efectivă $\varnothing$ se determină prin relația

$$\varnothing = \frac{V_r - V_{fs}}{V_r} \times 100 = \frac{V_{tp}}{V_r} \times 100, \qquad (I.1)$$

în care: V_r este volumul rocii (inclusiv golurile);
V_{fs} — volumul fazei solide;
V_{tp} — volumul total al porilor.

Porozitatea se poate exprima și în funcție de densitate:

$$\varnothing = \frac{\delta_m - \delta_g}{\delta_m - \delta_f} \times 100, \qquad (I.2)$$

în care: δ_m este densitatea matricei*;
δ_g — densitatea globală;
δ_f — densitatea fluidului care saturează porii.

Prezența argilei în pori conduce la o serie de dificultăți în determinarea porozității acestora.

---

* Prin matrice se înțelege partea solidă a rocii.

La rocile argiloase se deosebesc două feluri de porozități: efectivă care se determină cu relația 1 I. sau I. 2 și utilă ($\varnothing_u$), care se determină cu relația:

$$\varnothing_u = \varnothing \cdot \frac{\text{Volumul apei mobile}}{\text{Volumul apei mobile} + \text{apa fixată}}. \quad (I.3)$$

În rocile argiloase, o parte din apă este fixată de către particulele argiloase prin legături destul de tari, încît aceasta nu curge [3, 4].

Saturația. În interpretarea cantitativă a diagrafiilor se înțelege prin saturația în apă S_w raportul între volumul ocupat de apă V_w în porii rocii și volumul total al porilor V_{tp}:

$$S_w = \frac{V_w}{V_{pt}} \times 100. \quad (I.4)$$

Volumul ocupat de petrol în porii rocii, sau saturația în hidrocarburi, se calculează cu formula:

$$S_H = (1 - S_w) \times 100. \quad (I.5)$$

Permeabilitatea. Unul din cei mai importanți factori care determină valoarea economică-industrială a unui zăcămînt de hidrocarburi este permeabilitatea rocilor magazin.

Permeabilitatea este definită (STAS 1917-50 și 4621-54) ca proprietatea mediilor poroase de a permite circulația fluidelor prin golurile lor, respectiv de a fi străbătute mai ușor sau mai greu de apă sau gaze.

Permeabilitatea k se deduce din relația stabilită de Darcy:

$$Q = k \frac{1}{\eta} \frac{S}{l} (P_1 - P_2), \quad (I.6)$$

în care: Q este debitul de fluid, cm³;
η — viscozitatea, centipoise;
S — suprafața, cm²;
l — grosimea, cm;
P_1 și P_2 — presiunile din amonte și aval, kgf/cm²;
k — permeabilitatea, Darcy.

2. REZISTIVITATEA ȘI CONDUCTIVITATEA ROCILOR

Rezistivitatea ρ sau rezistența electrică specifică este proprietatea pe care o au rocile de a conduce în mod diferit curentul electric. Unitatea de măsură adoptată convențional este ohm-metrul, care este rezistența unui cub de rocă cu latura de 1 m la trecerea curentului electric îndreptat perpendicular pe una din fețe.

Rezistivitatea ρ a unui eşantion de rocă de lungime l, secţiune S şi rezistenţă R este dată de formula

$$\rho = R\frac{S}{l} \quad [\Omega m]. \tag{I.7}$$

Rezistivitatea şi conductivitatea sînt invers proporţionale:

$$\rho = \frac{1}{C}. \tag{I.8}$$

Unitatea de măsură adoptată convenţional pentru conductivitate este mho/m, inversul ohm-metrului. În scopul evitării zecimalelor în evaluarea conductivităţii rocilor se foloseşte submultiplul milimho/m.

Rezistivitatea reală a rocilor curate este dependentă de mai mulţi factori. Aceşti factori sînt: rezistivitatea părţii solide a rocilor, rezistivitatea apelor care saturează porii rocilor, temperatura mediului ambiant, porozitatea şi factorii litologici (factorul de rezistivitate al formaţiunii şi turtuozitatea), gradul de saturaţie în fluide, rezistivitatea filtratului şi a noroiului de foraj şi presiunea litostatică.

Rezistivitatea părţii solide a rocilor. Mineralele care compun rocile, datorită compoziţiei diferite pe care o au, determină rezistivităţi diferite pentru rocile în componenţa cărora intră [3, 5]. Majoritatea mineralelor ce compun rocile au o rezistivitate mare, din cauza lipsei de electroni liberi şi a gradului neînsemnat de disociere a cristalelor mineralelor. Aceste minerale se comportă ca izolatori faţă de un curent electric: în consecinţă, în acelaşi mod se vor comporta şi rocile în care predomină minerale rău conducătoare de electricitate.

În natură sînt şi minerale cu rezistivitate scăzută însă frecvenţa lor este mai redusă. Rezistivitatea rocilor în care se găsesc minerale bune conducătoare de electricitate în procent mai mare de 5% depinde de rezistivitatea acestor minerale [5]; o excepţie o constituie glauconitul, care determină o conductivitate crescută chiar cînd se găseşte într-un procent mai mic de 5% [2].

Rezistivitatea rocilor sedimentare stratificate depinde şi de direcţia după care se determină acest parametru în raport cu stratificaţia. Dintre rocile mai răspîndite care au rezistivităţi inegale în diferite direcţii (roci anizotrope) fac parte: argilele şistoase, şisturile argiloase, cărbunii minerali, alternanţele de strate subţiri de argile şi nisipuri etc. În cazul rocilor enumerate există de fapt o alternanţă de roci cu rezistivităţi diferite. Într-un asemenea pachet de roci, rezistivitatea măsurată perpendicular pe stratificaţie ($\rho\perp$) este mai mare decît rezistivitatea măsurată de-a lungul stratificaţiei ($\rho\parallel$) [5].

Anizotropia rezistivității λ se definește prin formula

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_{\parallel}}{\rho_{\perp}}}. \qquad (I.9)$$

Rezistivitatea măsurată de-a lungul stratificației se obține prin diagrafii de inducție sau laterolog, iar rezistivitatea în direcția perpendicularei pe stratificație se obține prin diagrafii electrice clasice (curbe normale). Cele mai de sus sînt valabile numai în cazul stratelor cu înclinări reduse.

Rezistivitatea apelor care saturează porii rocilor. La temperatură constantă, rezistivitatea ρ_w a apelor care saturează porii rocilor depinde de compoziția chimică și de concentrația sărurilor dizolvate.

Concentrația apelor de zăcămînt petroliere variază în limite foarte largi. De aceea, rezistivitatea apelor și rocilor saturate cu aceste ape variază, de asemenea, în limite foarte largi. Obișnuit, rezistivitatea rocilor saturate cu ape de zăcămînt variază între 0,2—1 000 ohm · m.

Cu cît concentrația în săruri a apelor de zăcămînt este mai mare, cu atît rezistivitatea acestora este mai mică și invers. Pentru concentrații identice a apelor de zăcămînt, rezistivitatea acestora poate fi diferită, în cazul cînd viscozitatea lor este diferită. În soluții mai vîscoase, mobilitatea ionilor scade, adică rezistivitatea crește în comparație cu soluțiile cu viscozitate redusă. Creșterea și descreșterea vîscozității soluțiilor depinde de temperatură.

Pentru concentrații și viscozități identice, rezistivitatea apelor de zăcămînt poate fi diferită în funcție de gradul de disociere a sărurilor [6].

Cele de mai sus se exprimă prin formula:

$$\rho_w = \frac{10}{(c_a \cdot m_a \cdot g_{da} + c_c \cdot m_c \cdot g_{dc})}, \qquad (I.10)$$

în care: c_a și c_c sînt concentrațiile în grame echivalente de anioni și cationi;

m_a și m_c — mobilitatea anionilor și cationilor;

g_{da} și g_{dc} — gradul de disociere a anionilor și cationilor.

Între sărurile conținute de apele de zăcămînt predomină NaCl, restul fiind $CaSO_4$, $MgSO_4$, $CaCl_2$, KCl etc. Întrucît și aceste săruri au un grad de disociere aproximativ egal cu al NaCl, pentru majoritatea scopurilor practice se consideră cantitatea totală de săruri existente în apa de zăcămînt, ca fiind săruri de NaCl.

În consecință, se poate admite că rezistivitatea apelor de zăcămînt este funcție de concentrația în grame echivalente de NaCl și de temperatură, cînd procentul cel mai mare de săruri este NaCl [5, 6]:

$$\rho_w = f(c,\ T). \qquad (I.11)$$

Rezistivitatea apelor de zăcămînt se poate determina dacă se cunoaște compoziția chimică a acestora (în g/100 cm³ de apă).

Exemplu. Se cunoaște compoziția chimică a apei dintr-un strat oarecare:

Anioni	Cationi
$Cl^- = 3{,}545$ g/100 cm³	$Na^+ = 2{,}299$ g/100 cm³
$SO_4^= = 0{,}096$ g/100 cm³	$Mg^+ = 0{,}024$ g/100 cm³
$CO_3^= = 0{,}060$ g/100 cm³	$Ca^+ = 0{,}040$ g/100 cm³

Se face suma greutăților anionilor și cationilor și se obține 6,064 g/100 cm³, respectiv 60,640 g/l. S-a considerat conținutul total în săruri = 60,640 g/l de NaCl, deoarece această sare se găsește în cantitatea cea mai mare. Rezistivitatea apei pentru concentrația $c = 60{,}640$ g/l sau 606,4 kg sare pe vagon se citește pe abaca din fig. 1 și este egală cu 0,160 ohm · m (temperatura apei s-a considerat = 18°C).

Modul de utilizare a abacei din fig. I.1. Se trasează o linie orizontală prin punctul de pe ordonată ce reprezintă temperatura de 18°C, pînă intersectează curba de concentrație 60,640 g/l (606,4 kg sare pe vagon); din punctul de intersecție se coboară verticala și se citește pe abscisă rezistivitatea apei: 0,160 ohm · m.

Efectul temperaturii asupra rezistivității apelor care saturează porii rocilor. Creșterea temperaturii are ca efect reducerea considerabilă a rezistivității apelor de zăcămînt și a soluțiilor concentrate în general. În exemplul ce urmează rezistivitatea filtratului de 1,2 ohm · m la 20° C se reduce la 0,40 ohm · m la 100°C, deci se reduce cu 300% pentru o creștere a temperaturii de 80°C. De aceea, pentru determinarea rezistivității unei soluții nu este suficient să se cunoască numai compoziția și concentrația de săruri, ci mai trebuie cunoscută și temperatura.

Variația rezistivității soluțiilor cu temperatura se explică prin creșterea sau descreșterea mobilității ionilor, întrucît viscozitatea soluțiilor variază în funcție de creșterea sau descreșterea temperaturii.

Pentru a calcula rezistivitatea unei soluții de concentrație dată de la temperatura $t°$ la temperatura t' se folosește abaca din fig. I.1.

Exemplu. Să se determine rezistivitatea filtratului la temperatura de 100°C, cunoscînd că rezistivitatea acestuia la temperatura de 20°C este de 1,2 ohm · m. Prin punctul de pe abscisă notat cu 1,2 ohm · m se ridică verticala pînă intersectează orizontala trasată prin punctul de pe ordonată marcat cu 20°C. Din punctul de intersecție se trasează o linie paralelă cu dreptele înclinate de pe abacă, pînă intersectează orizontala trasată prin punctul de pe ordonată marcat cu 100°C. Din punctul obținut se coboară verticala și se citește pe abscisă 0,4 ohm · m.

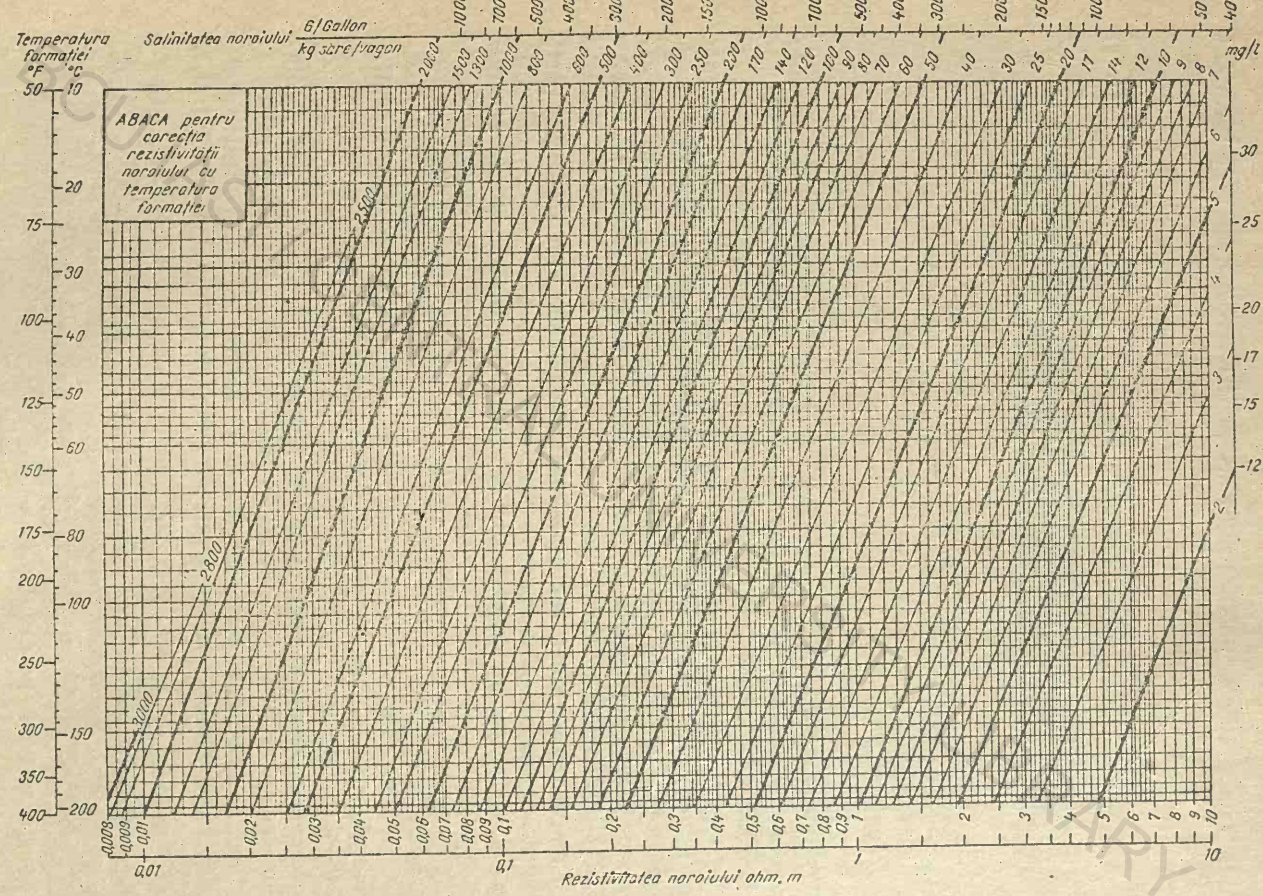


Fig. I.1. Abacă pentru determinarea rezistivității noroiului (ρ_n), filtratului (ρ_f) și a apei de zăcământ (ρ_w), în funcție de concentrația în săruri și de temperatură.

În interpretările cantitative este necesar să se cunoască rezistivitatea turtei noroiului (ρ_{tn}) și a filtratului (ρ_f), la temperatura stra-

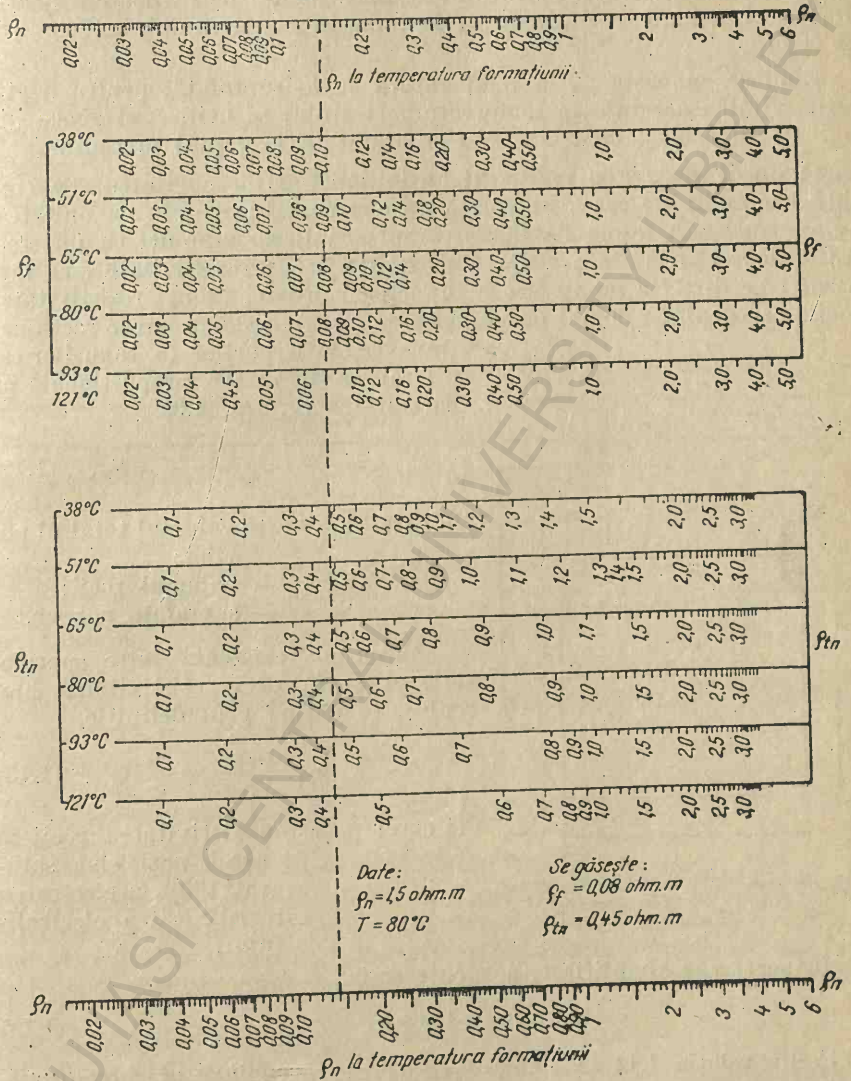


Fig. I.2. Abacă pentru determinarea rezistivității filtratului (ρ_f) și a turtei de noroi (ρ_{tn}) la diverse temperaturi, cînd se cunoaște rezistivitatea noroiului de foraj la temperatura stratului studiat.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

tului respectiv. Aceste rezistivităţi se determină utilizînd abaca din fig. I.2, însă pentru aceasta este necesar să se cunoască rezistivitatea noroiului la temperatura stratului studiat. Modul de utilizare a abacei din fig. I.2, cînd se cunoaşte ρ_n la temperatura stratului, este indicat pe figură.

Cînd se cunoaşte ρ_n la temperatura de la suprafaţă, pentru a afla rezistivitatea acestuia la temperatura stratului se utilizează abaca din fig. I.1 în acelaşi mod cum a fost arătat în exemplul precedent.

Factorul de rezistivitate al formaţiunii şi turtuozitatea. Se consideră o probă de rocă sub formă de cub cu latura egală cu unitatea, avînd porii sub formă de tuburi drepte capilare, umpluţi cu un electrolit de rezistivitate ρ_w. Dacă măsurătorile de rezistivitate s-ar face paralel pe direcţia de aşezare a tuburilor capilare, atunci rezistivitatea rocilor ar depinde numai de porozitatea lor. Aceasta deoarece secţiunea transversală a porilor (a tuburilor capilare) ar fi direct proporţională cu porozitatea (v. fig. I.3):

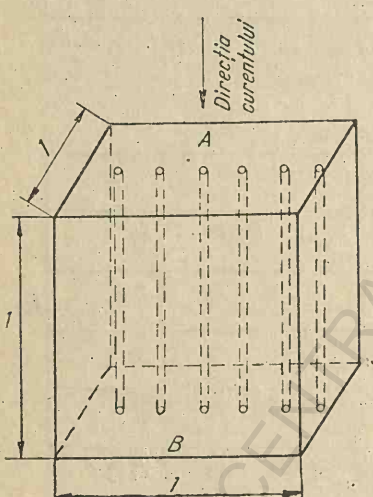


Fig. I.3. Cub avînd porii sub formă de tuburi capilare drepte.

$$ø = \frac{V_{tp}}{V_r} = \frac{1 \times S_p}{1 \times 1 \times 1} = S_p, \quad \text{(I.12)}$$

în care: V_{tp} este volumul total al porilor;
V_r — volumul rocii;
S_p — suprafaţa porilor.

Măsurînd rezistenţa între suprafeţele A şi B, deci rezistivitatea blocului, se obţine prin definiţie:

$$\rho_0 = \frac{\rho_w \times 1}{S_p} = \frac{\rho_w}{ø}, \quad \text{(I.13)}$$

în care: ρ_0 este rezistivitatea rocii ai cărei pori sînt saturaţi 100% cu electrolit;
ρ_w — rezistivitatea electrolitului.

În acest caz simplificat, se poate scrie:

$$\rho_0/\rho_w = 1/ø = F. \quad \text{(I.14)}$$

F din relaţia I.14 se numeşte *factor de rezistivitate al formaţiunii*.

În realitate porii rocilor nu au formă de tuburi capilare. Dacă lungimea reală a probei este l, lungimea medie, l_{med} a drumului pe care

îl urmează curentul electric prin soluție este mai mare, deoarece dispoziția porilor deschiși nu este coliniară. În acest caz, relația I.13 se poate scrie:

$$\rho_0 = \frac{\rho_w \, l_{med}}{\varnothing} \text{ sau } \frac{\rho_0}{\rho_w} = \frac{l_{med}}{\varnothing},$$

$$\text{sau } F = \frac{l_{med}}{\varnothing} \text{ sau } F = \frac{a}{\varnothing^m}. \qquad \text{(I.15)}$$

Exponentul „m" din relația I.15 se numește exponent al porozității sau *factor de cimentare* și valoarea lui variază între 1,3 și 2,2. În tabelul 1 sînt redate valorile lui m pentru o serie de roci frecvent întîlnite în foraje. Pentru stabilirea valorii lui m este necesar să se cunoască descrierea litologică a rocii.

Tabelul 1

Valorile factorului de cimentare „m", în funcție de litologia unor roci

Descrierea rocii	Valorile lui m
Roci neconsolidate (nisipuri friabile, calcare oolitice, nămoluri și turbe etc.)	1,3
Roci foarte slab cimentate (loess, lut calcaros etc.)	1,4—1,5
Roci slab cimentate (cu porozitate de 20% sau mai mare)	1,6—1,7
Roci moderat cimentate (nisipuri consolidate, gresii cu porozitate de 15% sau mai mică)	1,8—1,9
Roci puternic cimentate (nisipuri cu porozitate redusă, cuarțite, calcare, dolomite cu porozitate neregulată, cretă etc.)	2,0—2,2

Coeficientul a din relația I.15 variază între 0,62 în cazul nisipurilor și 1 în cazul formațiunilor dure.

În practică se utilizează formulele [3, 6]:

$$F = 1/\varnothing^2; \; F = 1/\varnothing^{2,2}; \; F = 0{,}62/\varnothing^{2,15}. \qquad \text{(I.16)}$$

Relația I.15 scoate în evidență următoarele:

— în expresia care definește factorul de rezistivitate al formațiunii F, rezistivitatea nu mai apare în expresia finală, ceea ce înseamnă că atunci cînd se măsoară rezistența (respectiv rezistivitatea) rocilor, valoarea lui F va fi aceeași, indiferent de rezistivitatea soluției care umple porii rocii;

— factorul F depinde de porozitatea ø a rocii;

— factorul F mai depinde de raportul l_{med}/l, adică de forma porilor și de modul în care sînt dispuși și legați între ei (deci două roci cu porozități identice pot avea factori de rezistivitate diferiți).

Rezumînd, se poate spune că rezistivitatea unei formațiuni curate saturată 100% cu apă de zăcămînt este dată de relația:

$$\rho_0 = F\rho_w. \tag{I.17}$$

Cum în general F este $=1/\varnothing^2$ atunci $\rho_0=\rho_w/\varnothing^2$. Generalizînd, se poate scrie:

$$\rho_r=\rho_w/\varnothing^2. \tag{I.18}$$

Turtuozitatea T a fost definită de Rose și Bruce [9] ca fiind pătratul raportului dintre drumul l_{med} parcurs de curentul electric într-un eșantion de rocă poroasă saturată 100% cu apă și lungimea acestuia:

$$T=\left(\frac{l_{med}}{l}\right)^2. \tag{I.19}$$

S-a arătat că $F=\frac{l_{med}}{l}\cdot\frac{1}{\varnothing}$ din care se obține:

$$\frac{l_{med}}{l}=F\cdot\varnothing. \tag{I.20}$$

Introducînd relația 20 în relația 19 se obține:

$$T=(F\cdot\varnothing)^2. \tag{I.21}$$

Pe de altă parte s-a arătat că.

$$F=a\cdot\varnothing^{-m}. \tag{I.22}$$

Înlocuind pe F din relația I.22 în relația I.21 se obține:

$$T=a^2\cdot\varnothing^{-2m+2}. \tag{I.23}$$

În cazul particular, cînd $a=1$ și $m=2$, se obține:

$$T=\varnothing^{-2}. \tag{I.24}$$

Gradul de saturație în fluide. Saturația în apă S_w a unei roci depinde de caracteristicile petrofizice ale rocii (porozitatea, permeabilitatea, turtuozitatea etc.) și de caracteristicile fluidelor prezentate (viscozitatea, densitatea, gradul de umectare și, în mod deosebit, de poziția pe verticală față de limita apă-petrol). Progresiv cu creșterea înălțimii în raport cu limita apă-petrol, saturația în apă scade de la 100% la o valoare minimă la acoperișul zăcămîntului, însă este diferită de zero. Consecința scăderii saturației în apă către suprafață asupra rezistivității rocilor-magazin este creșterea progresivă a rezistivității, care ajunge la valori extrem de mari (de ordinul a sute de ohm · m), dar nu este niciodată infinită.

Pentru a arăta care este relația între rezistivitatea reală a rocii ρ_r și saturația în apă S_w să considerăm o rocă ai cărei pori sînt umpluți parțial cu apă de zăcămînt, avînd rezistivitatea ρ_w, iar restul sînt umpluți cu petrol, după cum este indicat în fig. I.4.

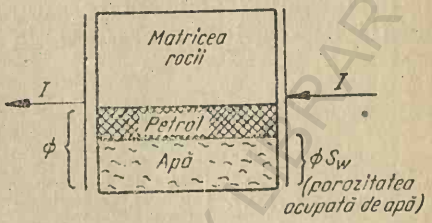


Fig. I.4. Repartizarea schematizată a volumelor ocupate de fluide într-o rocă poroasă.

Plecînd de la relația I.18, care arată că rezistivitatea unei roci este egală cu rezistivitatea electrolitului împărțită la porozitatea ocupată de acesta la pătrat, adică prin $\varnothing(S_w)^2$, se obține relația căutată (stabilită de Archie) [13, 14]:

$$\rho_r=\frac{\rho_w}{(\varnothing S_w)^2}, \text{ sau } S_w=\sqrt{\frac{\rho_w}{\varnothing^2\rho_r}}. \tag{I.25}$$

Formulele generale sînt:

$$S_w=\sqrt[n]{\frac{\rho_w}{\varnothing^2\rho_r}} \text{ sau } \sqrt[n]{\frac{F\rho_w}{\rho_r}} \text{ sau } \sqrt[n]{\frac{\rho_o}{\rho_r}}, \tag{I.26}$$

în care n este exponentul saturației, ce variază aproximativ între 1,7 și 2,2 depinzînd de tipul formațiunii.

Rezistivitatea filtratului. În timpul forajului găurilor de sondă, presiunea hidrostatică a coloanei de noroi este mai mare decît presiunea fluidelor ce saturează porii rocilor. În aceste condiții, filtratul ce se separă din noroiul de foraj pătrunde în formațiunile permeabile, iar particule solide din acesta se depun pe peretele găurii sondei, formînd turta de noroi. De obicei, turta de noroi are o permeabilitate redusă și reduce considerabil viteza de infiltrare. Filtratul, pătrunzînd în formațiunile permeabile, dislocuește fluidele existente în porii rocilor. În vecinătatea găurii sondei, fluidele inițiale conținute în porii rocii sînt aproape complet înlocuite cu filtrat: această zonă este denumită *zona spălată*. Rezistivitatea zonei spălate ρ_{x0} este dată de relația lui Archie:

$$\rho_{x0}=\frac{F\rho_f}{(S_{x0})^2}, \tag{I.27}$$

în care: ρ_f este rezistivitatea filtratului;
S_{x0} — saturația cu filtrat din zona spălată.

Din relația I.27 se deduce S_{x0}:

$$S_{x0}=\sqrt{\frac{F\cdot\rho_f}{\rho_{x0}}}. \tag{I.28}$$

Cunoscînd pe S_{x_0} se poate deduce saturația în hidrocarburi reziduale din zona spălată (S_{Hr}):

$$S_{Hr}=(1-S_{x_0})100. \qquad (I.29)$$

În tabelul 2 sînt redate saturațiile în hidrocarburi reziduale, în funcție de densitatea acestora în unități A.P.I. Dincolo de zona

Tabelul 2

Estimarea saturației în hidrocarburi reziduale

Densitatea în unități A.P.I.	Saturația în hidrocarburi reziduale estimată
40—50°	0—10 %
20—40°	10—20 %
10—20°	20—30 %
gaze	30—40 %

Fig. I.5. Zone ce se creează în strate datorită invaziei filtratului.

spălată, dislocuirea fluidelor din formațiune este din ce în ce mai puțin completă și se creează o zonă în care rezistivitatea trece de la ρ_{x_0} la rezistivitatea reală a formațiunii ρ_r. Această zonă este denumită *zona invadată*, iar rezistivitatea se notează cu ρ_{zi} (v. fig. I.5). De menționat că în zona invadată se include și zona spălată.

Nu se cunosc exact criteriile distribuției fluidelor din zona invadată. În fig. I.6 rezistivitatea din această zonă este indicată în creștere, dar aceasta ar putea tot așa de bine să scadă, în funcție de proporția de petrol, filtrat și apă de zăcămînt din porii rocii [3, 6].

Nu există o regulă de stabilire a adîncimii zonei de invadare, dar este util să fie introdus factorul d_{zi} denumit „diametrul echivalent electric al invaziei". Acest factor corespunde aproximativ diametrului cilindrului a cărui suprafață se află la mijloc în zona de tranziție, între zona spălată și „inel" Rezistivitatea măsurată în zona invadată este o medie a rezistivității fluidelor pe care le conține. Important de reținut ca o regulă generală este: dacă toate condițiile sînt identice, cu cît crește porozitatea, cu atît este mai mică adîncimea invaziei și cu cît se reduce porozitatea cu atît este mai mare adîncimea invaziei. În tabelul 2 bis sînt date valorile estimative ale diametrului zonei de invadare în funcție de porozitatea rocilor.

De regulă, diametrul zonei de invadare scade cu adîncimea, ca urmare a reducerii progresive a permeabilității rocilor.

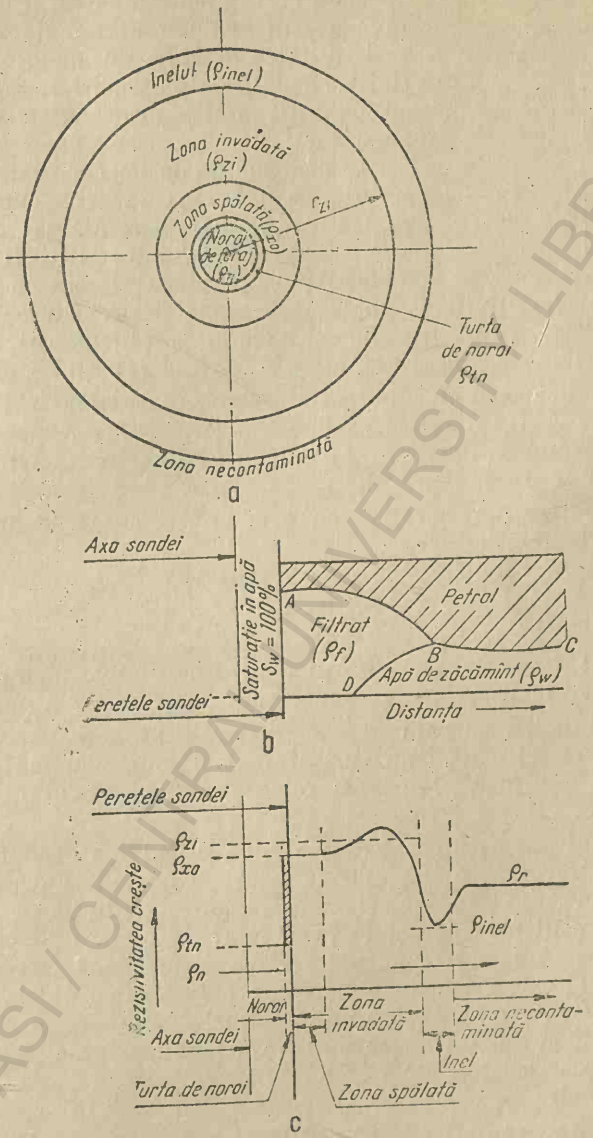


Fig. I.6. Distribuția rezistivităților într-un strat permeabil petrolifer având $S_{iv} \approx 60\%$: *a* — secțiune orizontală prin strat; *b* — distribuție radială a fluidelor în vecinătatea găurii de sondă; *c* — distribuția radială a rezistivităților [3].

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tabelul 2 bis

Estimarea diametrului zonei de invadare

Porozitatea	Diametrul estimat al zonei de invadare
5–10%	10 d
10–15%	5 d
15–20%	3 d
20–40%	2 d

Inelul este o zonă îngustă, situată între zona invadată și cea necontaminată. Extinderea și rezistivitatea acestuia nu au fost stabilite definitiv. Analizele matematice, deși incomplete au stabilit totuși următoarele cu privire la acest inel:

— depresiunea de pe curba de rezistivitate (v. fig. I.6) se extinde și devine mai plată pentru valori mai mari ale lui S_w;

— toate celelalte condiții fiind identice, raportul dintre rezistivitatea medie a zonei invadate și rezistivitatea inelului depinde de raportul ρ_f/ρ_w;

— raportul dintre grosimae inelului și diametrul invaziei, în cazul valorilor obișnuite, ale lui d_{zi}, variază între 15% și 25% [3, 6].

Dincolo de zona invadată este zona necontaminată. Rezistivitatea acestei zone este denumită *rezistivitate reală* și se notează cu ρ_r. În cazul unui strat saturat 100% cu apă de zăcămînt, rezistivitatea în zona necontaminată se notează cu ρ_0.

Pentru formațiuni curate, saturația în apă din zona necontaminată este dată de relația:

$$S_w = \sqrt{\frac{F\rho_w}{\rho_r}}. \qquad (I.30)$$

În cazul formațiunilor fisurate, permeabilitatea datorită fisurilor este în general foarte mare, mult mai mare decît a matricei rocii.

În cazul rocilor cu porozitate scăzută și fisurate se pot deosebi două situații: 1) O rețea de fisuri orientate mai mult sau mai puțin după aceeași direcție (paralele); 2) o rețea de fisuri orientată după două direcții.

În primul caz (porozitatea redusă și orientarea fisurilor unidirecțională), filtratul pătrunde ușor în fisuri, avansînd la o distanță relativ mare, evacuînd în același timp majoritatea fluidelor inițial conținute. Filtratul pătrunde și în porii matricei rocii, însă pe o distanță redusă și, ca urmare, grosimea turtei ce se formează este subțire (din porii matricei este evacuată o cantitate redusă din fluidele inițial conținute). În consecință, rezistivitatea zonei spălate (ρ_{x0}) se deosebește de rezistivitatea reală a formațiunii (ρ_r), iar raportul ρ_{x0}/ρ_f este diferit de factorul de rezistivitate F. În acest caz, relația $\rho_{x0} = F\rho_f(S_{x0})^2$ nu este aplicabilă.

În al doilea caz (porozitatea redusă și orientarea fisurilor după două direcții), fiecare bloc este înconjurat de filtrat (în apropierea găurii de sondă). Evacuarea fluidelor inițial conținute în porii rocii practic nu

are loc, deoarece presiunile compensîndu-se în jurul blocului, filtratul nu poate pătrunde în pori. Nu se formează turtă de noroi și rezistivitatea reală a rocilor nu este modificată.

Rezistivitatea petrolului și gazelor. Petrolul și gazele sînt medii rău conducătoare de electricitate. De aceea, cînd petrolul și gazele pătrund în porii unei roci care a fost inițial saturată 100% cu apă de zăcămînt, rezistivitatea va crește, în raport cu cantitatea de petrol sau gaze pătrunsă în porii rocii în locul apei sărate. Dar niciodată petrolul și gazele nu elimină în totalitate apa. Întotdeauna rămîne o cantitate de apă reziduală, care permite circulația curentului electric chiar prin cele mai bune roci petroliere sau gazeifere. De exemplu, unele nisipuri din Kuweit, deși conțin mai puțin de 5% apă sărată, restul spațiilor fiind umplute cu petrol sau gaze, totuși nu au o rezistivitate mare (circa 80—100 ohm · m); la aceasta contribuie și concentrația mare în săruri a apei, care este de 150 g/l [6].

Raportul dintre rezisitivitatea rocii ce conține petrol sau gaze (ρ_H) și rezistivitatea aceleeași roci conținînd numai apă sărată (ρ_0) a fost definit ca indice de rezistivitate I_ρ

$$I_\rho = \rho_H/\rho_0. \qquad (I.31)$$

Rocile petrolifere se evidențiază pe diagrafiile clasice de rezistivitate prin valori moderate.

Presiunea litostatică. Presiunea litostatică ca funcție a greutății stratelor superioare duce la o compactizare a rocii și, deci, la diminuarea porozității. În acest mod, rezistivitatea electrică a rocilor va crește simțitor cu adîncimea.

La adîncimi mari, dependența dintre factorul de formațiune și porozitate va fi mai complexă, făcînd inaplicabilă ecuația lui Archie.

Un efect negativ al presiunii litostatice la sondele adînci este crearea unei zone mai fisurate în jurul găurii de sondă, care devine improprie metodelor geofizice ce studiază microvolume, pentru determinări de rezistivitate, respectiv de porozitate.

Efectul argilei asupra rezistivității rocilor. Faptul că particulele argiloase fixează o parte din apa sărată conduce la influențarea rezistivității rocii. În această situație, argila se manifestă ca un mediu conducător separat, care se adaugă la cel constituit de soluția sărată, care poate curge liber prin porii rocii. De aceea, conductibilitatea unei roci care conține argilă diseminată are două componente: conductibilitatea fluidului care umple porii rocii (porozitatea utilă) și conductibilitatea particulelor argiloase ce au adsorbit apă sărată. Pentru scopurile practice, în investigarea geofizică a formațiunilor argiloase se poate con-

sidera că rezistivitatea argilelor rămîne constantă cînd nu variază salinitatea apei din pori.

Să considerăm un caz extrem: să presupunem că apa sărată interstițială (atît apa fixată de particulele solide cît și apa care poate curge liber) a fost înlocuită cu petrol sau apă cu rezistivitate mare. Dacă roca nu ar fi conținut argilă, rezistivitatea ei ar fi fost infinit de mare. Dacă roca a conținut argilă, rezistivitatea fluidului mobil va fi infinit de mare (conductibilitate zero), iar rezistivitatea argilei va fi redusă. În consecință rezistivitatea rocii va fi aceea a argilei diseminate singure.

De reținut sînt următoarele: un nisip sau o gresie argiloasă în care apa sărată a fost înlocuită cu petrol sau gaze vor avea o rezistivitate scăzută, datorită apei sărate fixată de particulele argiloase, deci un nisip sau o gresie argiloasă care conțin petrol sau gaze pot avea indicele de rezistivitate foarte mic (cazul nisipurilor gazeifere din județul Neamț sau al Pontianului din Depresiunea Panonică).

În cazul cînd un nisip sau o gresie argiloasă conțin în porii lor apă cu o concentrație mai mare decît a apei fixate de particulele argiloase, conductibilitatea acesteia din urmă devine neglijabilă. În acest caz, nisipurile și gresiile argiloase se comportă ca orice rocă curată cu o porozitate mare.

Date suplimentare despre influența argilei asupra rezistivității rocilor se pot găsi în [12, 13].

3. RAZA DE INVESTIGARE

Definirea noțiunii de rază de investigare în cazul unui mediu omogen și izotrop infinit este simplă. Astfel, în cazul dispozitivelor potențiale sau gradiente, raza de investigare este o sferă a cărui diametru este egal cu de două ori lungimea dispozitivului, iar în cazul unui dispozitiv inductiv, raza de investigare este un cilindru coaxial cu dispozitivul.

În condiții reale, cînd dispozitivele de măsurare sînt lansate în gaura de sondă (medii reale), definirea razei de investigare se complică, deoarece volumul materialului inclus în măsurare pentru un dispozitiv dat depinde de o serie de factori care se influențează. De exemplu, în cazul măsurării rezistivității aparente a rocilor cu un dispozitiv dat, raza de investigare depinde de geometria și rezistivitatea diferitelor medii învecinate (coloana de noroi, zona spălată, zona invadată, zona necontaminată și formațiunile învecinate). În medii reale, mărimea razei de investigare pentru un dispozitiv dat depinde de locul unde acesta se află.

BIBLIOGRAFIE

1. Stamatiu, M. **Mecanica rocilor**, București, Editura didactică și pedagogică, 1962, p. 62—70.
2. Ruhin, L. B. **Bazele litologiei**, București, Editura tehnică, 1966, p. 192—1963.
3. Pirson, Sylvain. **Handbook of Well log Analysis for oil and Gaz Formation Evaluation**, 1963, p. 3 și pp. 8—9, 22, 24—25.
4. Simandoux. **Mesures diélectriques en milieu poreux. Application a la mesure des saturations en eau**/ Revue de l'Inst. Français du Pétrole, 10—14 juin 1963, p. 193.
5. Dahnov, V. N. **Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă**, București, Editura tehnică, 1961, pp. 14—40.
6. Wyllie, M. R. I. **Bazele interpretării profilelor electrice ale sondelor**, București, Editura tehnică, 1959, p. 18.
7. *** **Realizări noi în diagrafia sondelor de țiței și gaze.** Institutul de documentare tehnică, p. 29, 1962.
8. Hamilton, R. G. **Noutăți în geologie și geofizică.** Nr. 12, 1962, p. 59. Traducere din World Oil, Vol. 154, nr. 5, aprilie.
9. Rose și Bruce. **Transactions AIME** 186, p. 127.
10. Hamilton, R. G. **Progresele recente în diagrafie și interpretare.** Noutăți în geologie și geofizică nr. 12, dec. 1962. Traducere din World Oil 154, nr. 5, aprilie 1962, pp. 122—132.
11. Tixier, M. P. **Porosity balance verifies water saturation determined from log.** Journal of Petrol nr. 7, iulie 1958.
12. Perkins, F. M., Drannon, H. R. **Interpretation of rezistivity and potențial of shaly reservoir rock.** Trans. A.I.M.E., V. 201, 1954.
13. Jaquin, C. **Etude des ecoulements et des équilibres de fluides dans les sables argileux.** Revue de l'Institut Français du pétrole. Nr. 4, 1965, pp. 1—49.
14. *** **Loganalysis Handbook P.G.A.C.** 1966.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CAPITOLUL II

POTENȚIALUL SPONTAN, POTENȚIALUL PROVOCAT ȘI POTENȚIALUL GRADIENT

1. POTENȚIALUL SPONTAN (PS)

Frații Schlumberger au semnalat în anul 1928 existența potențialelor spontane în gaura de sondă; primele diagrafii ale potențialului spontan au fost efectuate în anul 1929 de către frații Schlumberger.

1.1. Fundamentarea fizico-matematică și geologică a naturii potențialului spontan

Potențialul spontan își are originea într-un complex de procese și anume:

— difuzia ionilor din sărurile apelor de zăcămînt în fluidul de foraj și, invers, a ionilor din sărurile conținute de fluidul de foraj în apele de zăcămînt;

— adsorbția ionilor din fluidul de foraj și din apele de zăcămînt de către partea superficială a particulelor minerale din roci. Aceste două procese sînt conjugate și de aceea fac obiectul procesului de difuzie-adsorbție;

— oxidare-reducerea, care se produce la suprafața de contact a rocilor cu mediul fluid înconjurător;

— filtrarea (electrofiltrarea), care se referă atît la pătrunderea filtratului de fluid de foraj în spațiul poros al rocii, cazul cel mai frecvent, cît și la pătrunderea fluidelor din strate în gaura de sondă.

Fiecare din procesele enumerate poate crea un cîmp electric de autopolarizare, deosebindu-se următoarele activități:

— activitatea de difuzie-adsorbție, care apare în urma proceselor de difuzie-adsorbție (potențialul electrochimic);

— activitatea de oxidare-reducere, care apare în urma proceselor de oxidare-reducere a mineralelor ce compun roca (potențialul de oxidare-reducere);

— activitatea de filtrare care apare în urma proceselor de filtrare prin porii rocilor sau a apelor de zăcămînt în gaura de sondă (caz întîlnit foarte rar) sau a filtratului ce se separă din noroiul de foraj spre strat [1].

V. N. Dahnov [1] atribuie activităţile enumerate mai sus unei activităţi autocuprinzătoare pe care o denumeşte „activitate electrochimică naturală" definind-o astfel: „Se numeşte activitate electrochimică naturală sau proprie a rocilor, proprietatea unor roci de a crea în spaţiul înconjurător cîmpuri electrice de autopolarizare" [1].

În concluzie, potenţialele naturale reprezintă o însumare a potenţialelor care iau naştere în mod natural în gaura de sondă, datorită unor procese fizico-chimice (difuzia-adsorbţia, oxidarea-reducerea) şi electrocinetice denumite şi de electrofiltrare (filtrarea).

1.1.1. *Activitatea electrochimică de difuzie-adsorbţie*

În gaura de sondă, la contactul dintre stratele permeabile şi stratele impermeabile în prezenţa lichidului din gaura de sondă, se creează potenţiale de difuzie şi potenţiale de adsorbţie (de membrană). În rocile detritice lipsite practic de particule argiloase predomină activitatea de difuzie.

Activitatea de difuzie (*potenţialul de difuzie*). Potenţialul spontan ce apare în urma activităţii electro-chimice de difuzie este denumit *potenţial de difuzie* şi rezidă în faptul că activitatea apelor de zăcămînt diferă, în general, de activitatea fluidului din găurile de sondă care le străbat, deoarece în marea majoritate a cazurilor există o diferenţă de concentraţie şi de compoziţie a apelor de zăcămînt faţă de cea a fluidului de foraj.

Procesul de difuzie tinde să stabilească un echilibru al concentraţiilor. Conform legilor concentraţiei şi difuziei, ionii din soluţia mai concentrată *A* circulă dinspre aceasta spre soluţia cu concentraţie mai redusă *B* (fig. II.1). Această circulaţie a ionilor se face sub acţiunea presiunii osmotice. Ionii au viteze diferite de deplasare şi, ţinînd seama de sensul de deplasare a acestora, rezultă că soluţia cu concentraţie mai redusă va căpăta semnul ionilor care se deplasează cu viteză mai mare. În majoritatea cazurilor, apele de zăcămînt au o mineralizare mai mare decît a fluidului de foraj, datorită în special soluţiilor de NaCl pe care le conţin. De aceea, se produce o difuzie a ionilor de Na^+ şi Cl^- dinspre strat spre gaura de sondă. Întrucît ionii de Cl^- au viteza de difuzie mai mare decît ionii de Na^+, se va produce o acumulare a ionilor de Cl^- în zona invadată cu filtrat şi a ionilor de Na^+ în zona conţinînd apă de zăcămînt.

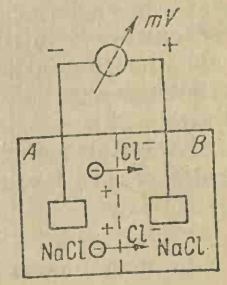


Fig. II.1. Potenţialul de difuzie. Soluţia *A* este mai concentrată decît soluţia *B*.

În felul acesta se creează un strat electric dublu, între armăturile căruia se stabileşte o diferenţă de potenţial de difuzie E_d [2].

În cazul rocilor detritice ce conţin ape sărate (cu excepţia nisipurilor şi gresiilor care conţin particule de argilă), valoarea diferenţei de potenţial E_d se determină prin relaţia lui Nernst:

$$E_d = \frac{RT}{nF} \cdot \frac{v_{Cl} - v_{Na}}{v_{Cl} + v_{Na}} \ln \frac{a_w}{a_f} = -K_d \ln \frac{a_w}{a_f}, \qquad (II.1)$$

în care: R este constanta universală a gazelor, egală cu 8,313, în Joule/°C g;
T — temperatura absolută (298°K);
n — valenţa electrolitului disociat (în cazul NaCl=1);
F — constanta lui Faraday, aproximativ egală cu 96 540 coulombi;
v_{Cl} — viteza de difuzie a ionilor de Cl^-;
v_{Na} — viteza de difuzie a ionilor de Na^+;
a_w — activitatea apei de zăcământ;
a_f — activitatea noroiului de foraj (respectiv a filtratului);
K_d — constanta forţei electromotoare de difuzie care depinde de temperatura stratului:

$$K_d = \frac{RT}{nF} \cdot \frac{v_{Cl} - v_{Na}}{v_{Cl} + v_{Na}}. \qquad (II.2)$$

Relaţia II.1 leagă potenţialul spontan de difuzie de produsul unei constante K_d, care se poate calcula (dacă se cunoaşte temperatura stratului) cu logaritmul raportului activităţii apei interstiţiale din strat a_w şi activităţii filtratului separat din noroiul de foraj a_f.

Termenul „activitate", care de multe ori, este înţeles în mod deformat este un termen termodinamic: activitatea este o funcţie a sistemelor concentrate (soluţii concentrate), care caracterizează abaterea comportării soluţiilor concentrate de la comportarea sistemelor diluate, ideale. Activitatea se exprimă ca produsul dintre concentraţie şi coeficientul de activitate [3].

Activitatea apei de strat a_w se poate exprima în funcţie de concentraţia în săruri a acesteia c_w şi de coeficientul de activitate f_{aw}:

$$a_w = c_w \cdot f_{aw} \approx c_w. \qquad (II.3)$$

În mod analog se exprimă şi activitatea filtratului a_f:

$$a_f = c_f \cdot f_{af} \approx c_f, \qquad (II.4)$$

în care c_f este concentraţia în săruri a filtratului, iar f_{af} — coeficientul de activitate a filtratului.

Rezultă că activitatea, deşi se exprimă în gram-mol/1 000 g apă, nu este aceeaşi cu concentraţia. Activitatea şi concentraţia sînt legate printr-un raport numit coeficient de activitate. Coeficienţii de activitate se găsesc în tabele standardizate. Important este faptul că dacă se cunoaşte concentraţia unei soluţii, în cazul de faţă a apei de zăcămînt şi a filtratului, se poate cunoaşte activitatea acelei soluţii şi invers [3].

În relaţia lui Nernst (II.1), vitezele de difuzie ale ionilor de Cl^- (v_{Cl}) şi ale ionilor de Na^+ (v_{Na}) pentru soluţii avînd temperatura de 25°C sînt:

$$v_{Cl}=67{,}6\times10^{-5}\ \text{cm s}^{-1}.\ \text{Volt}^{-1} \tag{II.5}$$

$$v_{Na}=45{,}6\times10^{-5}\ \text{cm s}^{-1}.\ \text{Volt}^{-1} \tag{II.6}$$

Cunoscînd vitezele de difuzie ale ionilor de Na^+ şi Cl^- dintr-o soluţie de NaCl cu o temperatură de 25°C, relaţia lui Nernst devine, după înlocuirea valorilor numerice pentru R, T, n, F şi trecînd la logaritmi zecimali [3]:

$$E_d=-11{,}6\ \lg\frac{a_w}{a_f}\ \text{[mV]}. \tag{II.7}$$

Înlocuind în formula (II.7) expresiile din formulele (II.3) şi (II.4) obţinem:

$$E_d=-11{,}6\ \lg\frac{c_w f_{aw}}{c_f f_{af}}\approx-11{,}6\ \lg\frac{c_w}{c_f}. \tag{II.8}$$

Activităţile soluţiilor electrolitice sînt invers proporţionale cu rezistivităţile lor (pentru o gamă suficient de largă a concentraţiilor). Datorită acestui fapt, relaţiile (II.7) şi (II.8) se pot scrie:

$$E_d=-11{,}6\ \lg\frac{a_w}{a_f}\ \text{[mV]}=-11{,}6\ \lg\frac{\rho_f}{\rho_w}\ \text{[mV]}. \tag{II.9}$$

În fig. II.2 este prezentată distribuţia ionilor de Cl^- şi a ionilor de Na^+ în cazul activităţii electrochimice de difuzie la contactul soluţiilor conţinute în strate nisipoase sau grezoase cu fluidul de foraj (considerînd că stratele nisipoase şi grezoase sînt practic lipsite de particule de argilă sau marnă şi sînt cuprinse între strate impermeabile). Concentraţia soluţiilor din stratul permeabil este mai mare decît a filtratului, respectiv a fluidului de foraj.

Activitatea de adsorbţie (potenţialul de adsorbţie). Dacă soluţiile de concentraţii diferite sînt separate printr-o membrană semipermeabilă (argilă, marnă) procesul de difuzie are loc prin canale microcapilare şi este însoţit de adsorbţia selectivă a unor ioni. Argila care separă gaura

de sondă de apa conținută în porii rocilor se poate considera ca o membrană semipermeabilă. Fluidul de foraj și apa de formațiune pot fi considerate ca electroliți de clorură de sodiu. Membrana permite trecerea cationilor de Na^+, dar reține anionii de Cl^-. În felul acesta se stabilește un echi-

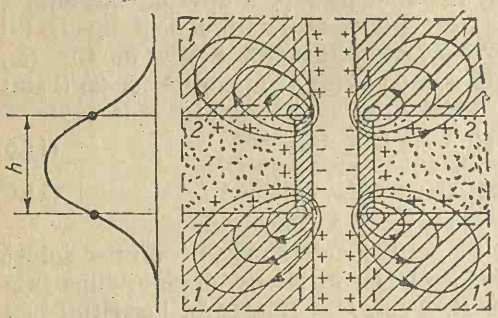


Fig. II.2. Distribuția ionilor de Cl^- și a ionilor Na^+ într-un strat nisipos sau grezos (2), intercalat între strate de marne (1).

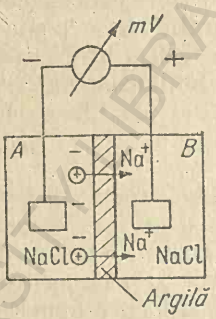


Fig. II.3. Potențialul de adsorbție. Soluția *A* este mai concentrată decît soluția *B*.

libru în care soluția diluată (*B*) se încarcă pozitiv în raport cu soluția cu concentrație ridicată (*A*), după cum este prezentat în fig. II.3.

Potențialul care se produce la contactul a două soluții separate de o membrană semipermeabilă de argilă poartă denumirea de *potențial de adsorbție* sau *potențial de membrană*.

Potențialul de adsorbție diferă atît ca semn cît și ca mărime de potențialul de difuzie care apare la contactul direct al soluțiilor.

Relația cantitativă care determină valoarea potențialului de adsorbție (E_a) se obține din relația lui Nernst (II.1), în care viteza anionilor este egală cu zero ($v_{Cl}=0$), deoarece anionii sînt imobilizați prin adsorbție. Astfel:

$$E_a=\frac{RT}{nF}\ \lg\ \frac{a_w}{a_f}, \qquad \text{(II.10)}$$

în care notațiile sînt aceleași ca în cazul relației II.1, a_w și a_f fiind activitățile medii ale soluțiilor concentrate și diluate respective.

Se poate aproxima, ca și în cazul precedent, că:

$$a_w \approx c_w=\frac{1}{\rho_w} \text{ și} \qquad \text{(II.11)}$$

$$a_f \approx c_f=\frac{1}{\rho_f}. \qquad \text{(II.12)}$$

Înlocuind relațiile II.11 și II.12 în relația II.10 și trecînd la logaritmul zecimal se obține:

$$E_a = K_a \lg \frac{\rho_f}{\rho_w}, \qquad (II.13)$$

unde K_a este coeficientul care caracterizează mărimea potențialului de adsorbție.

Valoarea coeficientului de adsorbție (K_a) al soluțiilor avînd temperatura de 25°C este 59,1 și atunci relația II.13 devine:

$$E_a = +59{,}1 \lg \frac{\rho_f}{\rho_w}. \qquad (II.14)$$

V. N. Dahnov explică activitatea de adsorbție prin: adsorbția electroliților neutri; adsorbția de către ionii din rețeaua cristalină a rocii a unor ioni din soluție; adsorbția din soluții a ionilor care formează cu particulele rocii compuși greu solubili; adsorbția de ioni rezultați în urma disocierii produselor hidrolizei mineralelor care formează roca [1].

Adsorbția electroliților neutri (*NaCl*). Acest fel de adsorbție este provocat de gradul diferit de hidratare a ionilor și mărimea neegală a sarcinilor lor electrice. Ionii mai puțin hidratați și cu valențe mai mari, cazul ionilor Cl^-, sînt reținuți mai ușor decît ionii nesaturați ai rețelei cristaline, decît ionii mai hidratați și cu valență mai mică (cazul ionilor Na^+). Aceasta duce la formarea pe suprafața particulelor solide a unui strat de ioni a cărui sarcină corespunde sarcinii ionului mai puțin hidratat sau ionului cu valența mai mare.

Cum însă ionii negativi sînt de obicei mai puțin hidratați și factorul hidratare joacă un rol predominant în procesul adsorbției electroliților neutri, suprafața fazei solide se încarcă în general negativ.

În cazul stratelor de argilă (impermeabile) străbătute de foraje, particulele de argilă (coloidale) vor adsorbi ionii de Cl^-, astfel că faza solidă va fi electronegativă, iar faza lichidă va fi electropozitivă, datorită prezenței ionilor de Na^+ (această fază se află spre interiorul găurii de sondă și la limita dintre stratele de argilă impermeabile și cele permeabile) (v. fig. II.2).

În cazul stratelor permeabile ce conțin particule de argilă sau chiar intercalații subțiri de argilă, repartiția și orientarea ionilor de Cl^- și de Na^+ va fi ca în fig. 10, poz. 3.

Adsorbția de către ionii din rețeaua cristalină a unor ioni din soluții. Ca urmare a diferenței care există între potențialul termodinamic al ionilor din rețeaua cristalină și cel al ionilor din soluție, ionii vor începe să treacă dintr-o fază într-alta. Astfel, datorită stratului electric dublu care se formează la contactul rocă-soluție, se ajunge la adsorbția ionilor

din electrolit cu semn contrar ionilor care formează pătura exterioară a acestui strat electric.

Adsorbția din soluții a ionilor care formează cu particulele rocii compuși greu solubili. În acest caz, adsorbția ionilor din soluții este similară cu cazul precedent, cu deosebirea că ionii adsorbiți trec în faza solidă formînd combinații chimice greu solubile.

Adsorbția de ioni rezultați din disocierea produselor hidrolizei mineralelor care formează roca. Acest gen de adsorbție joacă se pare un rol principal în procesul apariției de sarcini electrice la particulele argiloase.

Potențialul de difuzie-adsorbție sau potențialul electrochimic. În cazul activității electrochimice de difuzie-adsorbție, diferența de potențial rezultantă E_{da} sau potențialul spontan static, PS_{st}, este elementul de bază al potențialului spontan.

În gaura de sondă, forțele electromotrice de adsorbție și difuzie sînt înseriate și, în cazul cînd nu circulă nici un curent prin coloana de fluid, apare o diferență de potențial între suprafața argilei și cea a stratului permeabil:

$$E_{da}=PS_{st}=E_a+E_d=-70{,}7\ \lg\frac{\rho_f}{\rho_w}. \quad (II.15)$$

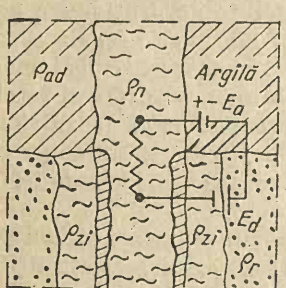


Fig. II.4. Potențialul de difuzie-adsorbție:
E_a — potențialul de absorbție;
E_d — potențialul difuzie.

Relația II.15 stă la baza determinării rezistivității apei de zăcămînt ρ_w din curba PS.

În fig. II.4 se prezintă schematic cum sînt înseriate forțele electromotoare de adsorbție și difuzie.

Circulația curentului datorită potențialelor de difuzie și de adsorbție. În fig. II.2 se indică schematic circulația curentului datorită potențialelor de difuzie și de adsorbție de la noroiul de foraj la zona invadată, de la aceasta prin nisipul acvifer la marnă și revenirea la fluidul de foraj. În cazul obișnuit, în care apele de zăcămînt au o concentrație de NaCl mai mare decît noroiul, E_{da} este pozitivă și curentul circulă în direcția săgeților indicate pe fig. II.2. Diferența de potențial dintre punctele din coloana de noroi din fața nisipului și din fața marnei este negativă.

De-a lungul traiectoriei sale, curentul trebuie să treacă printr-o serie de rezistențe atît în pămînt cît și în noroi. De-a lungul unei linii închise de circulație a curentului, suma căderilor ohmice de potențial este egală cu suma algebrică a tensiunilor electromotrice întîlnite [2, 3].

De asemenea, deoarece mărimea circulației curentului este constantă pe toată lungimea traiectoriei sale, căderea de potențial variază în funcție de rezistența secțiunii prin care el circulă. Aceasta înseamnă că suma căderilor de potențial (care este egală cu suma tensiunilor electromotrice) este împărțită între diferitele formațiuni și noroi, în proporție cu rezistențele întîlnite de curent în fiecare mediu traversat. În consecință, căderea de potențial ce se măsoară în noroiul din gaura de sondă este doar o parte din tensiunea electromotrice totală. Avînd în vedere că rezistența electrică a fluidului este de obicei mult mai mare decît rezistența celorlalte zone prin care circulă, se măsoară în fluidul de foraj cea mai mare parte din tensiunea electromotrice totală (v. fig. II.4).

Potențialul static. În cazul rocilor curate, potențialul spontan măsurat depinde numai de activitatea de difuzie-adsorbție și, după cum s-a arătat, este suma potențialelor de difuzie și de adsorbție.

Potențialul static (PS_{st}) se obține făcînd experiența indicată în fig. II.5. Curentul PS este oprit să circule prin plasarea a două dopuri izolante la limitele dintre stratul permeabil și stratele impermeabile. În această situație, valoarea potențialului în fiecare mediu va fi constant. În fig. II.5 PS-ul static din dreptul stratului permeabil este reprezentat prin linii drepte întrerupte.

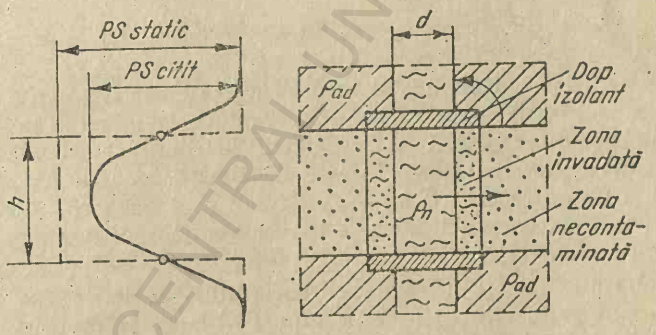


Fig. II.5. Obținerea potențialului static — PS_{st}.

Deci, dacă se plasează două dopuri izolante la limitele stratului permeabil cu stratele impermeabile, curba PS obținută devine curba PS_{st}.

În realitate, în găurile de sondă circulă un curent PS prin fluidul de foraj conducător și se obține curba PS reală, care în fig. II.5 este desenată cu o linie continuă, și amplitudinea anomaliei este mai mică decît în cazul curbei PS_{st}.

Potențialul pseudostatic. Prezența marnei sau argilei într-un strat permeabil determină adsorbția ionilor de Cl^-, reducînd migrația acestora; în consecință se reduce potențialul de difuzie E_d. Pe măsura creșterii procentului de argilă se reduce și potențialul de difuzie E_d care,

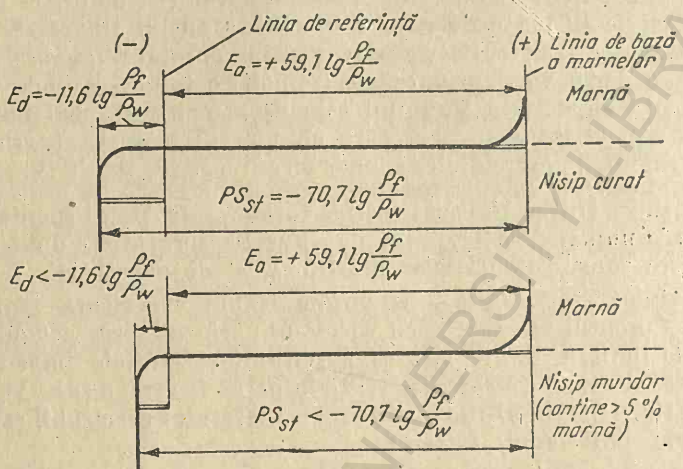


Fig. II.6. Reprezentare schematică a PS_{st} și PS_{pseudo}.

la un moment dat, poate deveni zero și în acest caz $E_{da} = E_a$. Creșterea procentului de argilă peste această limită duce la mărirea potențialului E_d într-un sens opus lui E_a. Astfel, efectul marnei interstițiale este reducerea tensiunii electromotrice totale. La limită, pentru un procent de marnă de 100%, $E_d = -E_a$ iar E_{da} devine egal cu zero, adică nisipul este acum în fond o marnă și nu se mai poate deosebi de marnele înconjurătoare (v. fig. II.6).

Presupunînd, ca și în cazul potențialului static, că se împiedică circulația curentului PS prin două dopuri izolante în dreptul unui strat conținînd argilă interstițială, diferența de potențial din noroi măsurat între dopuri și partea din afara dopurilor este denumită „potențial pseudostatic" [2].

Pentru valori egale ale activității noroiului de foraj și a apei de zăcămînt, PS-ul pseudostatic al unui nisip marnos este mai mic decît PS-ul static al unui nisip curat (v. fig. II.6). Raportul dintre PS-ul pseudostatic și PS-ul static se numește *factor de reducere* și se notează cu α. Factorul de reducere depinde de cantitatea și natura marnei interstițiale.

Prezența petrolului într-un nisip marnos tinde să mărească efectul marnei, deoarece petrolul restrînge mișcarea ionilor de Na^+, care în mod

normal difuzează spre suprafețele argiloase încărcate negativ. Astfel, toate celelalte condiții fiind egale, *PS*-ul pseudostatic al unui nisip petrolier va fi mai mic decît cel al unui nisip acvifer.

Dacă două nisipuri, ambele saturate 100% cu apă de zăcămînt, conțin același procent de marnă pe unitatea de volum de rocă și dacă activitățile fluidului de foraj și a apelor de zăcămînt sînt la fel, nisipul cu porozitate mai mică va indica un *PS* pseudostatic inferior. Ca o regulă generală, în formațiunile cu o porozitate redusă o cantitate mică de argilă reduce apreciabil amplitudinile anomaliilor *PS*. De asemenea, *PS*-ul nisipurilor acvifere cu porozitate mare rămîne practic egal cu *PS*-ul static dacă conținutul în argilă este redus.

Potențialul pseudostatic depinde de rezistivitatea formațiunii, în sensul că toate condițiile fiind identice, formațiunea cu rezistivitatea cea mai mare va avea un *PS* pseudostatic mai mic.

În ordinea descrescătoare a activității de difuzie-adsorbție, rocile pot fi clasificate astfel: 1 — șisturi argiloase; 2 — argile șistoase fin dispersate foarte acvifere; 3 — argile marine; 4 — marne compacte; 5 — argile nisipoase; 6 — gresii argiloase; 7 — calcare și dolomite argiloase; 8 — gresii slab cimentate; 9 — nisipuri, microgranulare și macrogranulare [1].

1.1.2. *Activitatea de oxidare-reducere*

Diferența de potențial datorită proceselor de oxidare-reducere se observă la anumite roci și minereuri, în mod deosebit la sulfuri, la rocile cu conținut de oxizi metalici aflați într-o fază de oxidare superioară sau inferioară față de oxizii metalelor din rocile înconjurătoare și la cărbunii minerali [1].

În procesul oxidării, roca care se oxidează pierde electroni și se încarcă pozitiv (deci pe profilul *PS* se va evidenția prin anomalie pozitivă), iar aceea care reduce capătă sarcină negativă (deci pe profilul *PS* se va evidenția prin anomalie negativă).

Minereurile singentice, care iau naștere în prezența oxigenului și a unei cantități de apă insuficiente, se înregistrează pe profilele *PS* prin anomalii pozitive, întrucît predomină fenomenele de oxidare. Printre acestea se numără mineralele care apar sub formă de concrețiuni feromanganoase (în depunerile nisipoase), glauconitul (în depunerile carbonato-argiloase), piritele.

Excepție fac mineralele care au luat naștere în bazine în care apele de fund au fost (sau sînt) lipsite de oxigen.

În timpul fenomenelor diagenetice mineralele care apar se datorează în general proceselor de reducere, ca urmare a descreșterii treptate a

oxigenului liber, a descompunerii substanței organice și apariției CO_2 și H_2S. Mediul reducător influențează în foarte mare măsură comportarea mineralelor de fier. În sedimentele nisipoase cu un conținut neînsemnat de substanță organică, în timpul diagenezei nu se creează un mediu reducător, în ele putîndu-se păstra oxizi de fier. În depozitele cu granulație mai fină, în care de regulă există mai multă substanță organică, existînd un mediu reducător, oxizii de fier și de mangan trec în protooxizi și chiar în sulfuri.

Datorită acestui fapt, minereurile de fier pot fi reprezentate pe profilele *PS*, fie prin anomalii pozitive, fie prin anomalii negative, după cum s-au format într-un mediu reducător sau oxidant.

În cazul cărbunilor minerali se observă o oarecare neconcordanță în modul lor de evidențiere pe profilele *PS* care, deși se formează într-un mediu reducător, apar pe profilele *PS* prin anomalii pozitive. Explicația ar fi următoarea: în timpul formări cărbunilor fenomenele de reducere sînt foarte lente și, ca atare, în timpul traversării de către foraje, aceștia se oxidează în prezența oxigenului liber din noroiul de foraj. Intensitatea mai mare a procesului de oxidare decît a procesului de reducere explică de ce cărbunii minerali (cu mici excepții) sînt marcați pe profilele potențialelor spontane prin anomalii mai mult sau mai puțin pozitive.

Se menționează că nu se întîlnesc diferențe de potențial în cazul rocilor sedimentare susceptibile a fi colectoare de hidrocarburi, cauzate de procese de oxidare-reducere (sau se întîlnesc extrem de rar).

1.1.3. *Activitatea de filtrare*

Activitatea de filtrare conduce la crearea unor diferențe de potențial electrocinetice de filtrare (de curgere) E_f. Aceste diferențe de potențial, care apar în timpul procesului de foraj, ca urmare a pătrunderii filtratului ce se separă din noroiul de foraj în porii rocilor, după majoritatea autorilor nu ar contribui la modificarea reprezentării profilului *PS* înregistrat. În acest sens M.R.I. Wyllie afirmă: „Este un fapt bine stabilit că filtratul de noroi care străbate prin turta de noroi formată în dreptul nisipurilor permeabile dă naștere unor potențiale de curgere care pot fi foarte mari, de exemplu pînă la 50 mV, atunci cînd sînt folosite noroaie de foraj, cu o rezistivitate mai mare de 1 ohm · m la temperatura de suprafață. Se știe acum cu siguranță că, în majoritatea cazurilor, aceste potențiale de curgere nu sînt înregistrate. Motivul pentru care nu se înregistrează aceste potențiale de curgere pare să fie faptul că potențialele de curgere de o valoare aproape identică cu acelea din dreptul turtelor de noroi ce s-au format în dreptul nisipurilor permeabile se nasc și în dreptul stratelor de marnă adiacente nisipurilor. Deși consi-

derate, în mod convențional, drept impermeabile, stratele de marnă sînt de fapt permeabile într-o măsură suficientă pentru a da naștere la potențiale de curgere. Asemănarea dintre natura chimică a unui strat

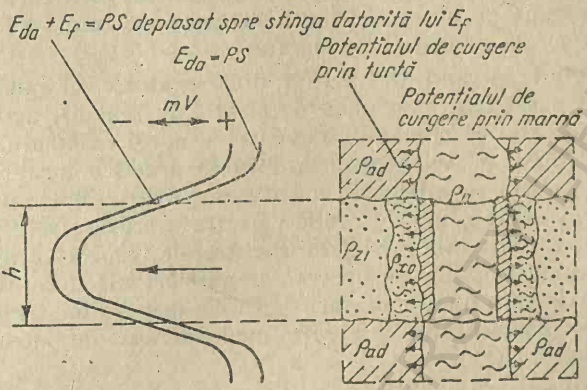


Fig. II.7. Deplasarea *PS*-ului datorită potențialului de filtrare (E_f).

de marnă și a turtei de filtrație (ea însăși compusă în mare parte din marnă dezagregată în timpul săpatului) face ca cele două potențiale de curgere să fie foarte asemănătoare. Cum *PS*-ul măsoară diferența de potențial dintre argile (marnă) și nisip, faptul că în dreptul lor există un potențial de curgere practic identic face ca acesta să se anuleze și să nu mai fie înregistrat.

În fig. II.7 se arată cum are loc această anulare și cum existența potențialelor de curgere are ca rezultat numai o deplasare a potențialului absolut, adică a liniei de bază a marnelor. Cum în operațiile de înregistrare a profilelor naturale operatorul așază linia marnelor (argilelor) într-un loc convenabil pe hîrtia de înregistrare, aceste potențiale de curgere nu au nici o importanță la interpretarea profilului *PS* [3].

Cele constatate de Wyllie și alții au valabilitate în situația în care presiunea hidrostatică a coloanei fluidului de foraj P_{hidro}, este mai mare decît a fluidelor din stratele traversate P_{str}. În cazul în care presiunea de strat întrece într-o măsură oarecare presiunea hidrostatică, deci în cazul cînd fluidele din unele strate au tendința de a pătrunde în gaura de sondă, se pare că diferențele de potențial datorită activității de difuzie-adsorbție E_{da} (respectiv profilul *PS*) sînt influențate de diferențele de potențial electrocinetice E_f, datorită activității de filtrare în mod diferențiat.

Trebuie avut în vedere că semnul diferenței de potențial de filtrare este:

negativ, cînd pătrunde în strate filtrat de noroiul de foraj ($-E_f\leftarrow$). În acest caz presiunea de strat este mai mică decît presiunea hidrostatică creată de coloana de noroi existentă în gaura de sondă ($P_{str}<P_{hidro}$). În acest caz E_f nu se ia în considerare;

pozitiv, cînd pătrund fluide din diverse strate în gaura de sondă ($+E_f\rightarrow$). În acest caz, presiunea de strat este sensibil mai mare decît presiunea hidrostatică creată de coloana de noroi existentă în gaura de sondă ($P_{str}>P_{hidro}$). Se menționează că în practica forajului sondelor această situație nu se întîlnește de obicei. Totuși, în timpul forajului, se constată în unele găuri de sonde care traversează strate cu hidrocarburi gazoase, un mic aflux de gaze din stratele respective în noroiul de foraj. În asemenea cazuri se observă gazeificări ale noroiului de foraj, care atestă existența unei deplasări de fluide (gaze) din strate spre gaura de sondă, deci posibilitatea existenței unei diferențe de potențial electrocinetic de filtrare (E_f).

După cum s-a arătat, filtratul care pătrunde în strat prin turta de noroi produce o forță electromotrice de filtrare, respectiv un potențial de filtrare. Valoarea numerică a potențialului de filtrare se stabilește prin relația:

$$E_f=0{,}37\sqrt{\rho_{tn}\cdot h_{tn}\cdot f\cdot \Delta p}, \qquad \text{(II.16)}$$

în care ρ_{tn} este rezistivitatea turtei de noroi, în ohm · m; h_{tn} — grosimea turtei de noroi în cm; f — filtratul în cm³/30 min la o presiune de 7 kgf/cm²; ΔP — presiunea diferențială, în kgf/cm².

1.2. Schema principială de înregistrare

Potențialul spontan se măsoară cu ajutorul a doi electrozi din plumb; un electrod N, situat la suprafața solului într-o groapă plină cu apă, în apropierea echipamentului sau în batalul de noroi; al doilea M, plasat la extremitatea unui cablu electric armat metalic la exterior, lansat în gaura de sondă plină cu noroi de foraj pe bază de apă dulce (fig. II.8).

Variațiile potențialului spontan care iau naștere în dreptul formațiunilor sînt înregistrate sub forma unei curbe continue, după cum este prezentat în fig. II.2. Potențialul se consideră negativ spre stînga și pozitiv spre dreapta. Anomaliile curbei cu amplitudini de sens negativ apar în dreptul stratelor permeabile și poroase care conțin apă interstițială mai sărată decît filtratul. Partea de curbă din fața marnelor sau argilelor, care se menține la distanță mai mult sau mai puțin constantă față de o linie verticală aleasă arbitrar, se numește „linia de bază a marnelor" sau prescurtat „linia marnelor".

De reținut că mărimea amplitudinilor anomaliilor de pe profilul *PS* se măsoară de la linia de bază a marnelor; de aceea, apropierea sau depărtarea profilului *PS* de linia verticală pe care sînt notate adîncimile nu joacă nici un rol. Ceea ce interesează este ca operatorul să plaseze de așa manieră linia de bază a marnelor încît majoritatea anomaliilor să fie înscrise complet în pista de pe diagramă rezervată potențialului spontan.

Scările de înregistrare se exprimă fie în mV/diviziune fie în mV/cm, aceasta în funcție de tipul stației de carotaj. Pentru stațiile de carotaj la care scările sînt exprimate în N · mV/diviziune, valorile numerice uzuale ale acestora sînt 4, 10 sau 20 mV pe diviziune. Pentru stațiile de carotaj la care scările sînt exprimate în N · mV/cm, valorile numerice uzuale ale acestora sînt 6,25 și 12,5 mV/cm.

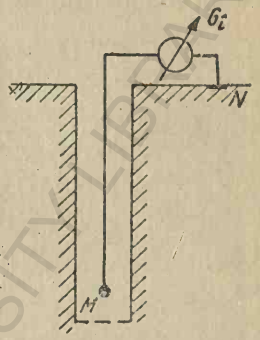


Fig. I.18. Schema principială pentru înregistrarea potențialului spontan:
M și *N* electrozi de măsură; *Gi* galvanometru înregistrator.

1.3. Interpretarea calitativă

Forma și mărimea amplitudinilor anomaliilor de pe profilele *PS* diferă de cele de pe profilul teoretic al potențialului static, deoarece curentul circulă în noroiul de foraj nu numai în fața formațiunii permeabile ci și pe o distanță scurtă, dincolo de limitele ei. În consecință, deși pe curba PS_{st} limitele unui strat permeabil sînt indicate prin colțuri pronunțate, curba *PS* indică o trecere treptată a potențialului la limita dintre strate, extinzîndu-se de-a lungul găurii de sondă dincolo de limitele stratului permeabil (v. fig. II.5 și II.11 *a*, *b*).

În dreptul stratelor se înregistrează doar o parte din căderea de potențial; ca urmare, amplitudinile anomaliilor de pe curba *PS* vor fi de regulă mai mici decît forma și mărimea amplitudinilor de pe curba teoretică PS_{st}.

Pentru stratele a căror grosime h este mai mare de 20 d și opun rezistență scăzută la trecerea curentului, aspectul și amplitudinea anomaliilor de pe curba *PS* se va apropia de a celor de pe curba PS_{st} în cazul formațiunilor curate și de forma și mărimea anomaliilor de pe curba PS_{pseudo} în cazul formațiunilor murdare.

Determinarea grosimii stratelor poroase și permeabile după curbele *PS* în cazul formațiunilor puțin rezistive constă în a uni punctele de inflexiune ale curbei, așa cum se indică în fig. II.5. Grosimea stratelor subțiri și a intercalațiilor se stabilește pe curbe înregistrate cu microdispozitive (microcarotaj și microlaterolog).

Potențialele spontane care iau naștere în gaura de sondă datorită proceselor fizico-chimice de difuzie adsorbție și oxidare-reducere sînt influențate de următorii factori:

— factorii geometrici ai găurii de sondă, între care: grosimea stratului, diametrul găurii*, distribuția simetrică sau asimetrică a cîmpului electric natural în raport cu mijlocul stratului;

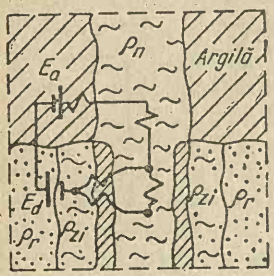


Fig. II.9. Potențialul de difuzie-adsorbție în roci cu rezistivitate redusă:
E_a — potențialul de adsorbție; E_d — potențialul de difuzie.

— rezistivitățile stratului, ale formațiunilor adiacente, și ale noroiului de foraj;

— adîncimea invadării.

Pe lîngă factorii enumerați, mai sînt și o serie de alți factori care denaturează forma și mărimea amplitudinilor anomaliilor de pe curbele *PS*, care vor fi arătați în cuprinsul acestui capitol. Felul cum factorii enumerați influențează aspectul curbei *PS* va fi expus în următoarea ordine: cazul formațiunilor cu rezistivitate scăzută, al formațiunilor cu rezistivitate medie, al formațiunilor dure și al formațiunilor argiloase.

1.3.1. *Formațiuni cu rezistivitate redusă*

Se definesc formațiuni cu rezistivitate redusă formațiunile la care $\rho_r \approx \rho_n$ sau $\rho_r \approx 10-20$ ohm · m.

În cazul acestor formațiuni, după cum rezultă din fig. II.9, forța electromotrice a potențialului spontan este conectată cu noroiul din gaura de sondă prin rezistențe a căror valoare este redusă. În acest caz se va obține o trecere bruscă de la stratele nisipoase la stratele argiloase, curentul scurgîndu-se prin rezistențele din apropierea limitelor dintre strate.

Influența grosimii stratelor. În fig. II.10 este arătată influența grosimii stratelor poroase și permeabile asupra profilelor *PS* care au rezistivități ρ_r apropiate de ale noroiului de foraj.

Pentru stratele groase, anomaliile de pe curbele *PS* vor semăna cu anomaliile de pe curbele *PS* static, cu deosebirea că trecerea de la formațiunea impermeabilă la cea permeabilă se face printr-o rotunjire a curbei; de asemenea colțurile de la vîrful anomaliei sînt rotunjite. Deci, în cazul stratelor groase cu rezistivitate redusă, amplitudinea anomaliei *PS* este aproximativ egală cu a anomaliei *PS*-static, iar grosimea

* Într-un strat în care există o zonă de invadare, diametrul acestei zone este echivalentul unei găuri de sondă de diametru mai mare decît acela măsurat pe cavernogramă, deoarece curentul spontan circulă și prin această zonă.

stratului este foarte bine redată și se determină prin unirea punctelor de inflexiune ale cursei (v. fig. II.5 și II.11).

Pentru stratele subțiri, amplitudinea anomaliei *PS* este mai mică decît a anomaliei *PS*-static și cu cît stratul este mai subțire cu atît amplitudinea anomaliei *PS* se reduce (v. fig. II.10).

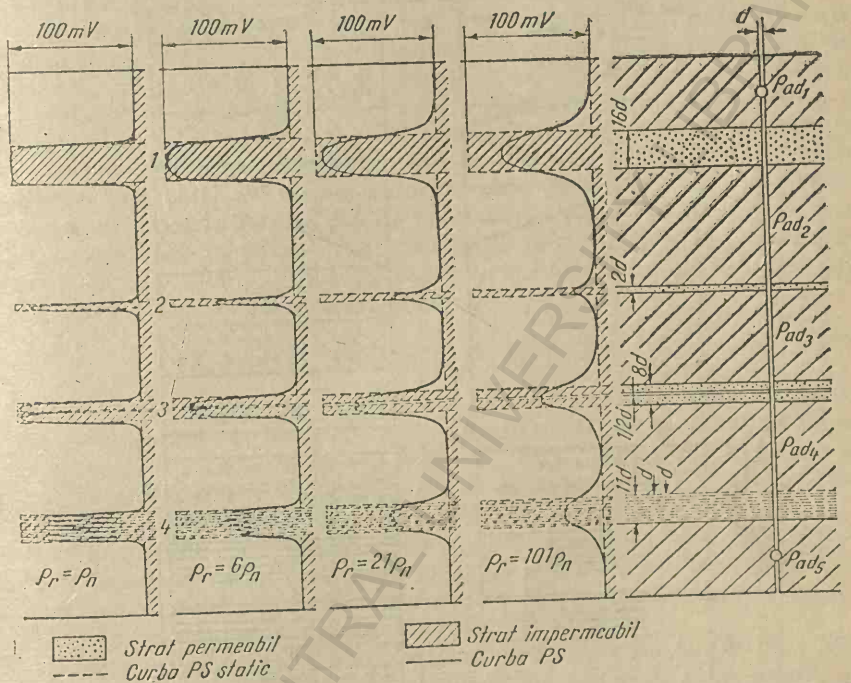


Fig. II.10. Influența rezistivității noroiului de foraj ρ_n, a grosimii h și a rezistivității stratului ρ_r asupra profilelor PS (după H. G. Doll).

O intercalație argiloasă dă un vîrf către potențialul pozitiv. O alternanță de strate subțiri argiloase și strate permeabile subțiri este reprezentată de o curbă ale cărei vîrfuri și depresiuni sînt ca dinții unui pieptene (v. fig. II.10 și II.11 *f*).

Influența rezistivității stratelor. Cînd rezistivitatea reală ρ_r a stratului este mai mare decît a fluidului de foraj ρ_n, anomaliile de pe curbele *PS* sînt rotunjite, limitele dintre strate mai puțin exacte și, dacă toate celelalte condiții sînt identice, amplitudinile anomaliilor sînt mai mici decît atunci cînd valoarea raportului ρ_r/ρ_n se apropie de 1. Cele de mai sus sînt reprezentate în fig. II.10 (cazurile $\rho_r=6\rho_n$ și $\rho_r=21\rho_n$). Repre-

zentările din fig. II.10 sînt teoretice și s-a neglijat influența zonei de invadare [2, 3].

Din analiza reprezentărilor din fig. II.10 se constată că lățimea anomaliilor pe curbele PS se extind în afara limitelor stratelor pe măsură

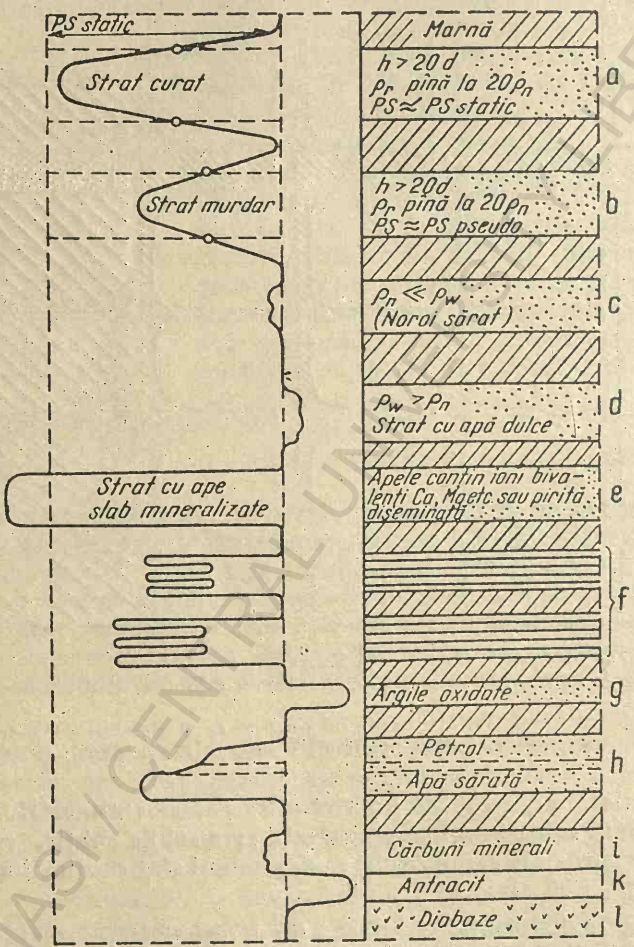


Fig. II.11. Forma curbei PS în dreptul unor strate.

ce crește valoarea raportului ρ_r/ρ_n și pe măsură ce grosimea stratului este mai mică.

Un pachet de strate subțiri este evidențiat pe curba PS printr-un minim sau maxim general, în cuprinsul căruia stratele subțiri sînt evidențiate prin maxime și minime locale. Cu cît grosimea stratelor subțiri care compun pachetul este mai mare, cu atît ele sînt mai clar evidențiate pe curba PS [1].

Influența noroiului de foraj. Această influență a fost arătată în mare parte și a reieșit că ea este predominantă asupra profilelor PS. În continuare, influența noroiului de foraj se analizează sub raportul rezistivității apei de zăcămînt ρ_w și a rezistivității noroiului ρ_n. Cînd valoarea raportului ρ_w/ρ_n este mică, cazul noroaielor a căror rezistivitate se apropie de rezistivitatea apelor de zăcămînt, potențialele electrochimice sînt mici. Cu cît se reduce rezistivitatea noroiului de foraj în raport cu rezistivitatea apei de zăcămînt, cu atît mai mult se reduc potențialele electrochimice, iar deviațiile pe curba PS sînt foarte mici sau chiar inexistente, curba semănînd cu o linie mai mult sau mai puțin dreaptă (v. fig. II.11, *c*). Din relația

$$E_{da} = -K_{da} \lg \frac{a_w}{a_f} = -K_{da} \lg \frac{\rho_f}{\rho_w} \qquad (II.17)$$

rezultă că potențialul electrochimic va fi redus pe măsură ce crește activitatea noroiului de foraj. De aceea, profilele PS înregistrate în noroaie sărate vor avea amplitudini scăzute. Pe baza datelor statistice s-a stabilit că profilele PS înregistrate în noroaie ce conțin pînă la 60 g/l săruri dizolvate pot fi interpretate calitativ.

Pentru formațiunile saturate cu apă dulce, a căror activitate este mai mică decît a noroiului de foraj, se produce o inversare a profilului PS, în sensul că linia de bază a marnelor va fi în sensul negativ (←), iar a nisipurilor în sensul pozitiv (→) (fig. II.11, *d*).

Creșterea excesivă a potențialului spontan (mai mare decît PS_{st}) are loc în cazul formațiunilor saturate cu ape slab mineralizate care conțin pe lîngă ionii obișnuiți de sodiu și ioni bivalenți de calciu, magneziu etc. sau pirită diseminată (v. fig. II.11, *e*).

În cazul noroaielor de foraj cu rezistivitate foarte mare, de exemplu noroaie pe bază de produse petroliere, practic nu se pot înregistra profile PS. Explicația este că în noroaie cu rezistivitate infinit de mare, curenții naturali nu mai pot circula.

Influența diametrului găurii de sondă (*d*). Pe măsură ce crește diametrul găurii de sondă se rotunjesc vîrfurile anomaliilor și se reduc amplitudinile acestora din dreptul stratelor poroase și permeabile. O dată cu îngustarea vîrfului anomaliei se observă o lărgire a lățimii către bază, depășind cu mult limitele stratului.

Influența zonei de invadare. Procesul invaziei stratelor permeabile și poroase cu filtrat are drept efect depărtarea peretelui sondei de zona

unde are loc difuzia care produce potențialul de difuzie (E_d). În felul acesta apare că diametrul sondei este mult mai mare și se spune că avem de-a face cu un diametru fictiv (d_F).

În plus, prin mărirea diametrului zonei de invadare, o parte din liniile de curent *PS* trec direct din stratul de marnă în zona invadată

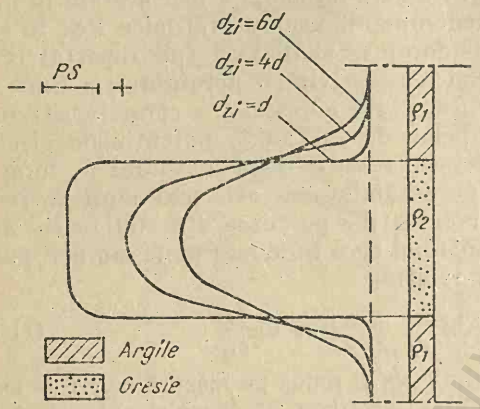


Fig. II.12. Influența zonei de invadare asupra curbelor PS.

Fig. II.13. Potențialul de difuzie-adsorbție în roci cu rezistivitate medie:
E_a — potențial de adsorbție;
E_d — potențial de difuzie.

fără a pătrunde în coloana de noroi. Ca urmare, amplitudinea anomaliei *PS* se reduce o dată cu creșterea diametrului zonei de invadare și crește deschiderea acesteia în dreptul liniei de bază a marnelor (v. fig. II.12).

1.3.2. *Formațiuni cu rezistivitate medie*

Sînt considerate ca fiind cu rezistivitate medie formațiunile care au rezistivitatea reală ρ_r de ordinul zecilor de ohm · m*.

Pentru aceste formațiuni, după cum rezultă din fig. II.13, forța electromotrice a potențialului spontan este conectată cu noroiul de foraj din gaura de sondă prin rezistențe a căror valoare este mai mare decît rezistența noroiului. În această situație se măsoară în noroiul de foraj o mică parte din tensiunea electromotrice totală, avînd drept rezultat reducerea considerabilă a amplitudinilor anomaliilor de pe curbele *PS*, față de

* Nu există o delimitare precisă între formațiuni cu rezistivitate redusă, medie și dure.

amplitudinea de pe curba *PS* static. Reducerea amplitudinilor anomaliilor *PS* se accentuează pe măsură ce grosimea stratelor este mai mică și rezistivitatea stratelor crește.

În fig. II.10 sînt arătate o serie de cazuri privind influența grosimii reduse a stratelor asupra aspectului și mărimii amplitudinii anomaliilor de pe curbele *PS*. Pe lîngă reducerea amplitudinilor anomaliilor, pe măsura reducerii grosimii stratelor se observă o lărgire a bazei anomaliilor mult peste limitele stratului.

Influența grosimii stratelor subțiri conduce la deformarea profilelor *PS* de așa manieră, încît nu se pot face corecții în vederea determinării rezistivității apei de zăcămînt.

Ceilalți factori, care au fost discutați în paragraful precedent, influențează în același fel aspectul curbelor *PS* în dreptul stratelor cu rezistivitate $\rho_r \approx 100$ ohm · m.

1.3.3. *Formațiuni dure*

Se definesc formațiuni dure, formațiunile a căror rezistivitate reală ρ_r depășește cîteva sute de ohm · m. În acest caz, conductivitatea între o zonă poroasă *1* aflată la un potențial *V* și o zonă impermeabilă *3* care se află la un potențial de referință se realizează după schema din fig. II.14 Noroiul constituie o rezistență liniară și electrodul de măsură M un cursor care indică potențialul în fiecare punct al rezistenței. Căderea de potențial în dreptul formațiunilor dure (foarte rezistive) se face după o dreaptă înclinată a cărei pantă este constantă [2, 3].

În cazul unei succesiuni de zone cu rezistivități foarte mari, zone poroase și zone impermeabile, aspectul cursei *PS* este ca cel prezentat schematic în fig. II.14.

Profilul *PS* în dreptul stratelor groase cu rezistivități foarte mari, de ordinul sutelor de ohm-metri, nu este bine definit; se poate spune

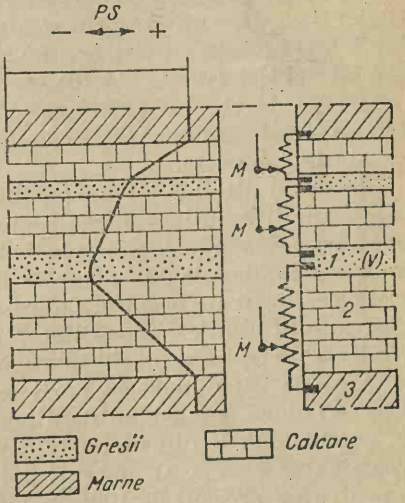


Fig. II.14. Reprezentarea schematică a profilului PS într-o succesiune de zone foarte rezistive cu zone poroase permeabile și zone impermeabile.

doar că are o alură ușor ondulată. Profile de acest gen se întîlnesc foarte frecvent în dreptul rocilor carbonate. Pe astfel de profile *PS*, este aproape imposibil a preciza limitele dintre strate. Cu toate acestea, este important de luat în considerare că orice schimbare sau orice variație a profilului *PS* poate avea o semnificație din punct de vedere fizic. Simplele ondulații ale profilului *PS* pot oferi informații indicative asupra caracterului acestui gen de roci și anume: o ondulație îndreptată spre linia de bază a marnelor indică prezența de material marnos în dreptul zonei respective; o ondulație ce se depărtează de linia marnelor indică o rocă cu o porozitate și permeabilitate mai mare decît a zonelor învecinate [3].

De menționat că regulile enumerate mai înainte cu privire la delimitarea zonelor permeabile și a zonelor impermeabile după profilele *PS* și-au pierdut valabilitatea, în prezent utilizîndu-se în acest scop profilele înregistrate cu dispozitive microlaterolog.

1.3.4. *Formațiuni argiloase*

Se prezintă sub două forme: alternanțe de argile și nisipuri și argile diseminate în porii nisipurilor sau ai gresiilor.

Alternanța de strate subțiri puțin rezistive cu argile și a stratelor foarte rezistive alternînd cu argile a fost studiată și reprezentată în fig. II.10.

În cazul existenței alternanțelor influența lor asupra apectului profilelor *PS* se manifestă prin reducerea amplitudinilor anomaliilor curbelor *PS* și aceasta cu atît mai mult cu cît formațiunile sînt mai rezistive și mai subțiri (v. fig. II.10).

În fig. II.11, *f* se pot observa două alternanțe, una de nisipuri acvifere și argile compacte și a doua o alternanță de nisipuri petrolifere cu argile compacte.

În cazul alternanței nisipurilor petrolifere cu argile compacte, reducerea amplitudinilor anomaliilor *PS* este mai pronunțată, deoarece, după cum s-a arătat, prezența petroluluî într-un nisip marnos restrînge mișcarea ionilor de Na^+, care în mod normal difuzează spre suprafețele argiloase încărcate negativ. Ca urmare, toate celelalte condiții fiind identice, amplitudinile anomaliilor *PS* sînt mai reduse în cazul nisipurilor argiloase petrolifere decît în cazul nisipurilor argiloase acvifere.

Argilele diseminate în porii rocilor reduc migrarea ionilor de clor, deci se reduce potențialul de difuzie. Pentru un anumit procent de argile, potențialul de difuzie poate deveni zero. Crescînd procentul de argilă diseminată peste acest procent, potențialul de difuzie își schimbă semnul și pentru un procent de 100% argilă nu va mai exista potențial spontan. În consecință, prezența argilei diseminate în roci are ca efect reducerea amplitudinilor anomaliilor *PS* pînă la anularea acestora pentru un procent de 100% argilă.

1.3.5. *Diagrafii PS cînd se schimbă linia de bază a marnelor*

Linia de bază a marnelor se poate schimba din cauza proprietăţilor ionice diferite a argilelor sau din cauza salinităţilor diferite a apelor interstiţiale. Dacă diferenţele sînt mari, atunci determinarea lui *PS* static este dificilă.

În fig. II.15 se prezintă o curbă teoretică *PS* la care linia de bază a marnelor a fost schimbată. Pentru a determina valoarea amplitudinii

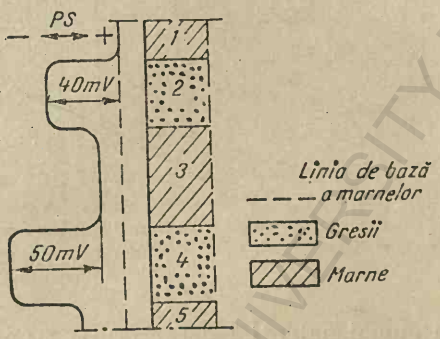


Fig. II.15. Schimbarea liniei de bază a marnelor.

anomaliei *PS* din dreptul stratului permeabil şi poros *2* se măsoară amplitudinea anomaliei faţă de linia de bază a marnei *1* respectiv 40 mV. În acelaşi mod se procedează şi pentru stratul permeabil şi poros *4*. Pentru acest strat se vor măsura 50 mV plecînd de la linia de bază a marnei *3* [2, 12].

Dacă s-a determinat rezistivitatea apei interstiţiale ρ_w după profilul *PS* din dreptul unor asemenea strate, se recomandă a se verifica rezultatele după probele de apă din dreptul stratelor corespondente din alte foraje.

1.3.6. *Diagrafii PS cînd diametrul zonei de invadare se schimbă în cuprinsul stratului*

În stratele care au o permeabilitate bună pe verticală, în acoperişul stratului se poate acumula o cantitate mai mare de filtrat, după cum este indicat în fig. II.16. În dreptul porţiunii din strat în care s-a acumulat o cantitate mai mare de filtrat se va reduce amplitudinea anomaliei, deoarece creşte diametrul fictiv al găurii de sondă (d_F). Într-un astfel de caz se va determina *PS* static după anomalia *PS* de la partea inferioară a stratului (ex. 40 mV) [12].

Un alt caz de schimbare a diametrului zonei de invadare în cuprinsul unui strat este cînd în spatele turtei de noroi nu există filtrat pe o porțiune din strat. Acest caz este prezentat schematic în fig. II.17. În porțiunea din strat în care apa de zăcămînt este în contact direct cu turta

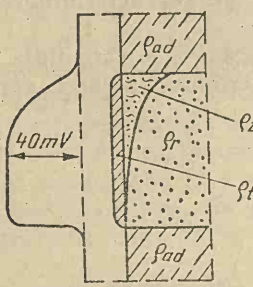


Fig. II.16. Anomalie PS în dreptul unui strat cu permeabilitate mare pe verticală [12].

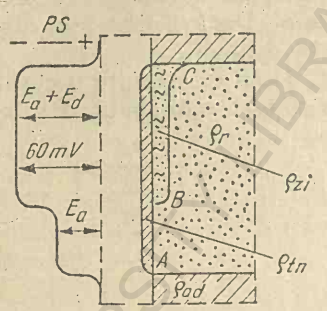


Fig. II.17. Anomalie PS în dreptul unui strat care nu are filtrat în spatele turtei de noroi pe porțiunea AB [12].

de noroi va exista numai potențial de adsorbție (E_a) și lipsește potențialul datorat efectului difuziei (E_d). În porțiunea din strat în care apa de zăcămînt este în contact cu filtratul, va exista atît potențial de adsorbție cît și potențial de difuzie și, în consecință, amplitudinea anomaliei PS din această porțiune va fi mai mare decît amplitudinea anomaliei PS de la baza stratului. În asemenea cazuri se va determina PS static după anomalia PS de la partea superioară a stratului. (S-a neglijat potențialul datorit turtei de noroi).

1.3.7. *Diagrafii PS cînd există și activitate de oxidare-reducere*

Interpretarea profilelor se complică în cazul cînd pe lîngă potențialul electrochimic (difuzie-adsorbție) sînt prezente și potențiale datorită reacțiilor de oxidare-reducere. Astfel, prin existența reacțiilor de oxidare-reducere unele argile cuprinse între alte argile se pot distinge prin anomalii pozitive ale potențialelor naturale (v. fig. II.11). De aceea, la interpretarea profilelor PS se recomandă să se țină seama de toate modificările posibile, în legătură cu prezența diferitelor cîmpuri de polarizare naturală a rocilor și aceasta este posibil prin interpretarea profilelor PS în corelare cu profilele înregistrate cu alte dispozitive, ca de exemplu profilele radioactivității naturale și diverse diagrafii de rezistivitate aparentă [1].

În fig. II.18 se reprezintă schematic extinderea valorilor *PS* în diverse roci, cînd porii acestora sînt saturaţi cu apă dulce, sălcie sau sărată şi noroiul este dulce sau sărat [7].

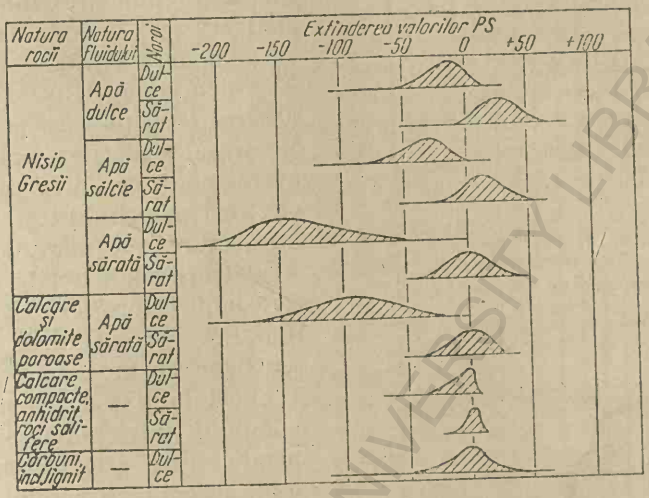


Fig. II.18. Reprezentare schematică a extinderii valorilor PS în diverse roci [7].

1.3.8. *Deformarea profilelor PS*

Deformarea profilelor *PS* se datoreşte potenţialelor parazitare şi defecţiunilor echipamentului de carotaj.

Potenţialele parazitare sînt provocate de următoarele cauze: nestabilitatea potenţialelor electrodice; mişcarea electrozilor; depunerea particulelor solide din noroiul de foraj; existenţa cîmpurilor de galvanocoroziune; zgomotele electrice diverse [1].

Defecţiunile echipamentului de carotaj care conduc la deformarea profilelor *PS* sînt magnetizarea tobei echipamentului şi pierderile de curent.

Nestabilitatea potenţialelor electrodice apare de obicei cînd se fac înregistrări cu electrozi din plumb de calitate inferioară, care se polarizează. În acest caz, profilul *PS* se deplasează progresiv cu adîncimea, deoarece cînd temperatura creşte se modifică potenţialul absolut al electrodului *M*. Crescînd potenţialul electrodului *M* cu creşterea temperaturii are loc deplasarea profilului *PN* [1].

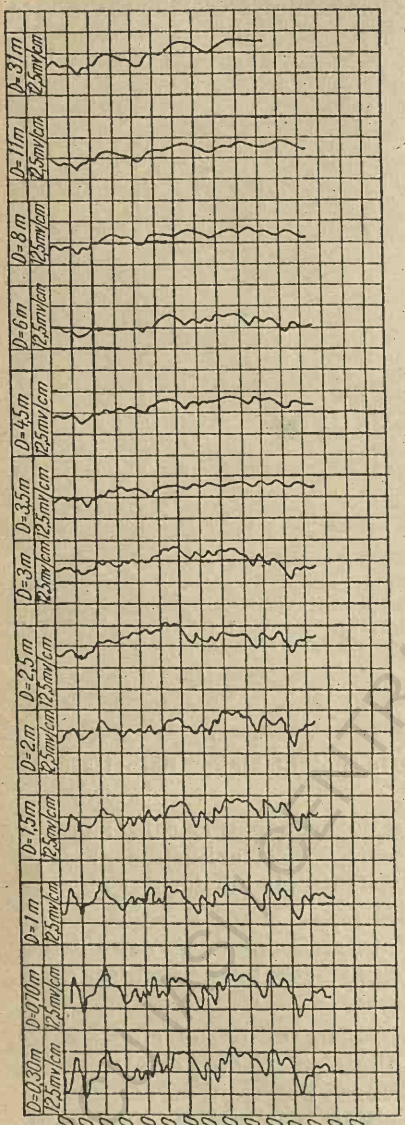


Fig. II.19. Profile PS înregistrate în prezența curenților de galvanocoroziune în gaura de sondă. Profilul din dreapta nu este influențat de prezența curenților de galvanocoroziune.

Depunerea particulelor solide din noroiul de foraj provoacă micșorarea treptată a potențialului electrodului *M*, deplasînd profilul *PN* spre dreapta pe măsură ce adîncimea crește.

Potențialele datorite mișcării electrozilor deplasează profilul *PS* în sensul valorilor negative și apare cînd se înregistrează cu electrozi polarizabili și viteza de înregistrare este mare.

Potențialele datorită galvanocoroziunii deformează vizibil profilul *PS*. Fenomenul de galvanocoroziune este provocat de existența bimetalului la partea superioară a lestului, între plumb și miezul metalic (care este obișnuit din oțel), atunci cînd noroiul de foraj are proprietăți acide. În astfel de condiții se formează o pilă electrică care produce un cîmp electric suplimentar. Curentul ce se naște tinde să pătrundă în stratele mai puțin rezistive și circulă în dreptul stratelor foarte rezistive pînă întîlnește un strat conductiv. Ca urmare a acestui fapt, profilul înregistrat nu mai este un profil *PS* ci mai degrabă un profil de rezistivitate aparentă: anomalii cu amplitudini mari în dreptul stratelor rezistive și anomalii cu amplitudini reduse în fața stratelor conductive. Influența curenților de galvano-coroziune se reduce pe măsura depărtării electrodului *M* de lestul de plumb și pe măsura reducerii acidității noroiului de foraj. Toate condițiile rămînînd identice,

efectul curenților de galvano-coroziune crește o dată cu creșterea rezistivității și compactității rocilor.

În fig. II.19 sînt prezentate o serie de curbe *PS* înregistrate în condițiile existenței unui curent de galvanocoroziune, într-o gaură de sondă al cărui noroi avea proprietăți acide, iar rocile străbătute aveau rezistivitate foarte mare, de ordinul a 600 ohm · m (șisturi verzi compacte). Curbele *PS* au fost înregistrate cu diverse distanțe între lestul de *Pb* și electrodul *M*. Profilele *PS* înregistrate cu distanțe reduse între lest și electrodul *M* seamănă foarte bine cu profilele de rezistivitate aparentă înregistrate cu dispozitiv gradient. Pe măsura măririi distanței lest-electrod, curbele înregistrate se apropie de alura profilului PS real [4].

Zgomotele electrice pot fi de origine mecanică: contacte imperfecte la colector (care se recunosc pe diagrama *PS* prin periodicitatea lor) sau la atingerea sau apropierea de obiecte metalice (se recunosc pe diagrama *PS* prin anomalii cu amplitudini de sens pozitiv). Zgomotele electrice mai pot fi provocate de curenți vagabonzi, de trenuri sau tramvaie electrice, de aparate de sudură electrică și altele.

Magnetizarea tobei echipamentului induce în spirele cablului armat metalic la exterior și înfășurat pe toba granicului o forță electromotrice periodică, ușor de recunoscut pe curba PS, avînd aspectul unui șir de anomalii cu amplitudini negative și pozitive ca ale unei sinusoide.

Pierderile de curent se recunosc pe curbele PS prin salturi bruște anormale, sau prin aplatisarea anomaliilor.

Un caz aparte de deformare a profilelor *PS* are loc cînd se fac înregistrări cu cablu armat metalic la exterior și distanța dintre electrodul de măsură *M* și punctul de racordare la cablul metalic al dispozitivului ce poartă electrodul *M* este redusă.

Într-un astfel de caz, în fond se înregistrează un gradient al potențialului natural. Deformarea profilelor *PS* este cu atît mai pronunțată cu cît rocile sînt mai rezistive și distanța dintre electrodul de măsură și punctul de racordare a dispozitivului de măsură la cablu metalic este mai mică, iar noroiul are proprietăți acide sau bazice.

1.4. Determinarea rezistivității apei de zăcămînt după profile *PS*

În acest scop se determină potențialul static în prima etapă, iar în a doua etapă se determină rezistivitatea apei de zăcămînt.

Rezistivitatea apei de zăcămînt ρ_w a cărei cunoaștere este necesară în fond pentru determinarea saturației în apă S_w a stratelor, cu ajutorul uneia din relațiile:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{F\rho_w}{\rho_r}}\ ;\quad S_w = \sqrt[n]{\frac{\rho_w}{\varnothing^m \rho_r}}\ ;\quad S_w = \sqrt[n]{\frac{0{,}62\ \rho_w}{\varnothing^{2{,}15}\rho_r}} \qquad \text{(II.18)}$$

1.4.1. *Determinarea potențialului static*

Pentru determinarea PS_{st} este necesar să se cunoască potențialul spontan citit pe curba *PS* în dreptul stratului care interesează. Valoarea lui *PS* se măsoară în raport cu linia de bază a marnelor și linia nisipului.

În cazul nisipurilor curate avînd o grosime mai mare de 20 *d*, o zonă de invadare redusă, precum și rezistivitatea moderată, citirea pe profilul *PS* în dreptul stratelor de acest gen reprezintă tocmai potențialul static, fără a mai fi necesare corecții.

În cazul nisipurilor curate subțiri, pentru care se cunoaște rezistivitatea reală sau rezistivitatea zonei invadate este necesară corectarea valorii potențialului spontan citită pe curba *PS* pentru a se obține valoarea lui PS_{st}. În acest scop se folosesc abace ca cele prezentate în fig. II.20 [6].

Pentru obținerea unui factor de corecție corespunzător al valorii potențialului spontan citit pe diagrafia *PS* este necesar ca diametrul zonei invadate să fie redus, iar raportul dintre rezistivitatea argilelor ρ_{ad} și rezistivitatea noroiului de foraj să fie cunoscut cu suficientă exactitate. Tot pentru determinarea factorului de corecție este necesar să se cunoască valoarea raportului dintre rezistivitatea reală a stratului ρ_r și rezistivitatea noroiului de foraj ρ_n.

În cazul nisipurilor argiloase subțiri, dacă se corectează valoarea *PS* citită în dreptul stratului respectiv se obține valoarea potențialului pseudostatic și în continuare nu mai este posibil a se determina PS_{st}. În acest caz, se trece la determinarea lui PS_{st} dintr-un nisip curat învecinat, dacă există. În caz contrar, în nisipurile argiloase subțiri nu se poate determina PS_{st}.

Modul de utilizare a abacei din fig. II.20. Pentru determinarea coeficientului de corecție a valorii potențialului spontan citit în dreptul stratului ce interesează sînt necesare următoarele date: *PS*, care se citește pe curba *PS*; *h* grosimea stratului, care se măsoară pe curba *PS* sau după curbele de microrezistivitate; ρ_r, determinată după una din următoarele diagrafii: inductivă, laterolog-3, investigarea electrică laterală (B.K.Z.), curba de rezistivitate de 18"; ρ_{ad}, determinată după una din următoarele diagrafii: inductivă, laterolog-3, curba normal lungă 64 in (diametrul găurii de sondă însă să fie mai mic de 15 in); *d* diametrul găurii de sondă, după cavernogramă sau microcavernogramă; ρ_n, stabilită prin măsurători de laborator, corectată la temperatura formațiunii, utilizînd abaca din fig. I.1.

Procedeul de lucru. Se alege abaca corespunzătoare din fig. II.20 pentru cea mai apropiată valoare a raportului ρ_{ad}/ρ_n. Se înscrie valoarea raportului ρ_r/ρ_n pe ordonată, de unde se trasează orizontala pînă inter-

sectează curba h/d corespunzătoare (dacă este necesar se interpolează); în continuare se trasează verticala și se citește pe abscisă valoarea factorului de corecție. Dacă factorul obținut este mai mare de 1,5 și valoarea raportului ρ_{ad}/ρ_n se află între valorile înscrise pe abace este necesară o interpolare între factorii de corecție obținuți pe cele două abace între care se află valoarea raportului ρ_{ad}/ρ_n.

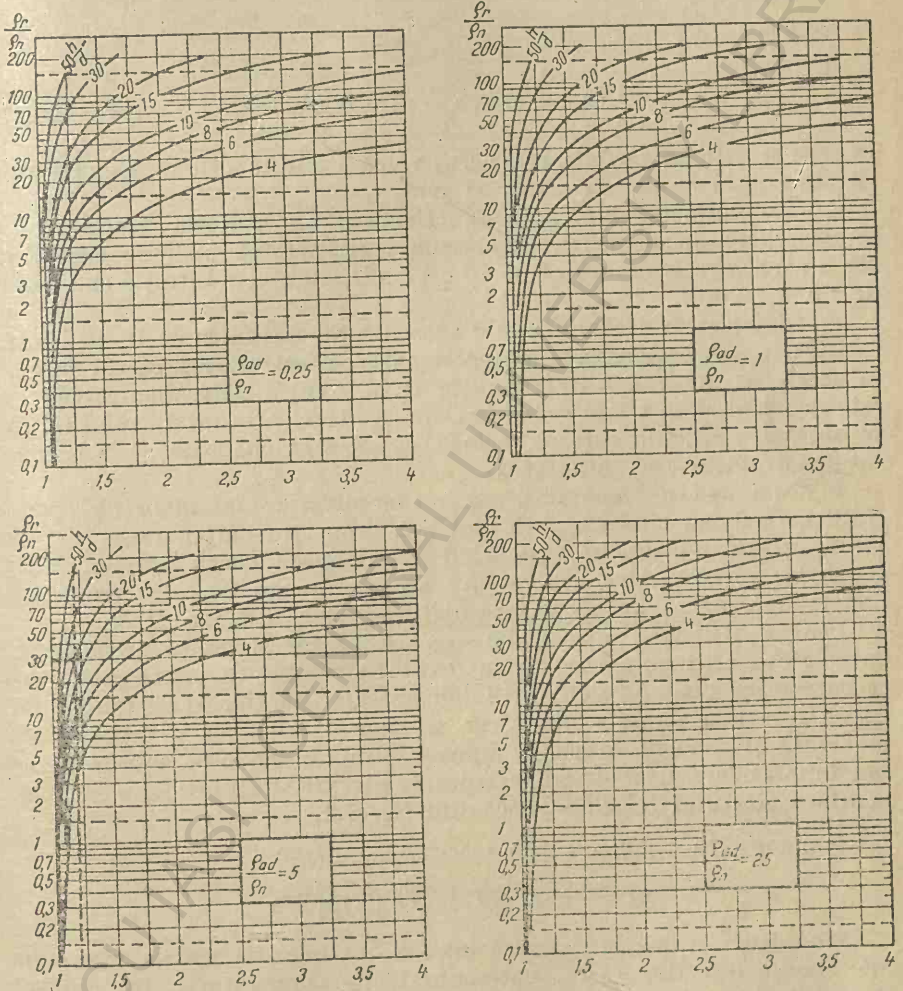


Fig. II.20. Abace pentru determinarea factorului de corecție al *PS* pentru influența straturilor adiacente și a grosimii stratului [6].

BIBLIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITARĂ

Exemplu: $PS = -80$ mV; $\rho_r = 30$ ohm · m; $\rho_n = 1$ ohm · m; $h = 10$ pic.; $d = 6$ in
Se calculează raporturile: $\rho_{ad}/\rho_n = 5/1 = 5$; $\rho_r/\rho_n = 30/1 = 30$; $h/d = 10 \times 12/6 = 20$.
Se utilizează abaca $\rho_{ad}/\rho_n = 5$ și se găsește factorul de corecție egal cu 1,2.
$PS_{st} = PS \times 1{,}2 = -80 \times 1{,}2 = -96$ mV.

1.4.2. *Determinarea rezistivității apei de zăcămînt folosind PS_{st}*

Relația care leagă PS_{st} de ρ_w este:

$$PS_{st} = -K \lg \frac{a_w}{a_f} = -K \lg \frac{\rho_f}{\rho_w}, \qquad \text{(II.19)}$$

în care K este un coeficient a cărui valoare este funcție de temperatură și este redată în abace (v. fig. II.21).

La determinarea lui ρ_w în funcție de PS_{st}, conform relației :II.19 se deosebesc două cazuri, după cum rezistivitatea apei de zăcămînt are o concentrație mai mică de 10 g/l NaCl sau o concentrație mai mare de 10 g/l NaCl.

a. Cînd apa de zăcămînt are o concentrație mai mică de 10 g/l NaCl, rezistivitatea acesteia este proporțională cu activitatea a_w și numai în acest caz are valabilitate relația II.19. Pentru determinarea lui ρ_w este suficient să se folosească abaca din fig. II.21 prin intermediul căreia se obține ρ_f/ρ_w, din care se deduce ρ_w dacă se cunoaște ρ_f la temperatura stratului care interesează.

b. Cînd apa de zăcămînt are o concentrație mai mare de 10 g/l NaCl activitatea apelor a_w nu mai este proporțională cu rezistivitatea lor ρ_w. Datorită acestui fapt, cînd se utilizează abaca din fig. II.21 se obține rezistivitatea echivalentă ρ_{we} și nu rezistivitatea reală ρ_w. Convertirea lui ρ_{we} în ρ_w se face utilizînd abaca din fig. II.22.

Pentru utilizarea abacei din fig. II.21 sînt necesare următoarele date: PS_{st}, citit pe curba PS în dreptul stratului ce interesează, care se corectează cînd $h < 20\,d$, utilizînd abacele din fig. II.20 (nu se fac corecții pentru stratele ale căror grosimi $h > 20\,d$, au o rezistivitate moderată și zonă de invadare redusă); stratele argiloase subțiri nu se iau în considerare; T — temperatura la nivelul stratului; ρ_f — la temperatura stratului folosind abaca din fig. I.2.

Exemplu: $PS_{st} = -100$ mV; $T = 65°C (150°F)$;

$\rho_f = 1$ ohm · m la $65°C (150°F)$.

Procedeul: se înscrie valoarea lui PS_{st} pe una din scalele orizontale ale abacei din fig. II.21, corespunzătoare temperaturii din dreptul stratului, iar prin punctul înscris se trasează verticala pînă intersectează scala ρ_f/ρ_{we} inferioară. Din punctul astfel obținut se duce o dreaptă

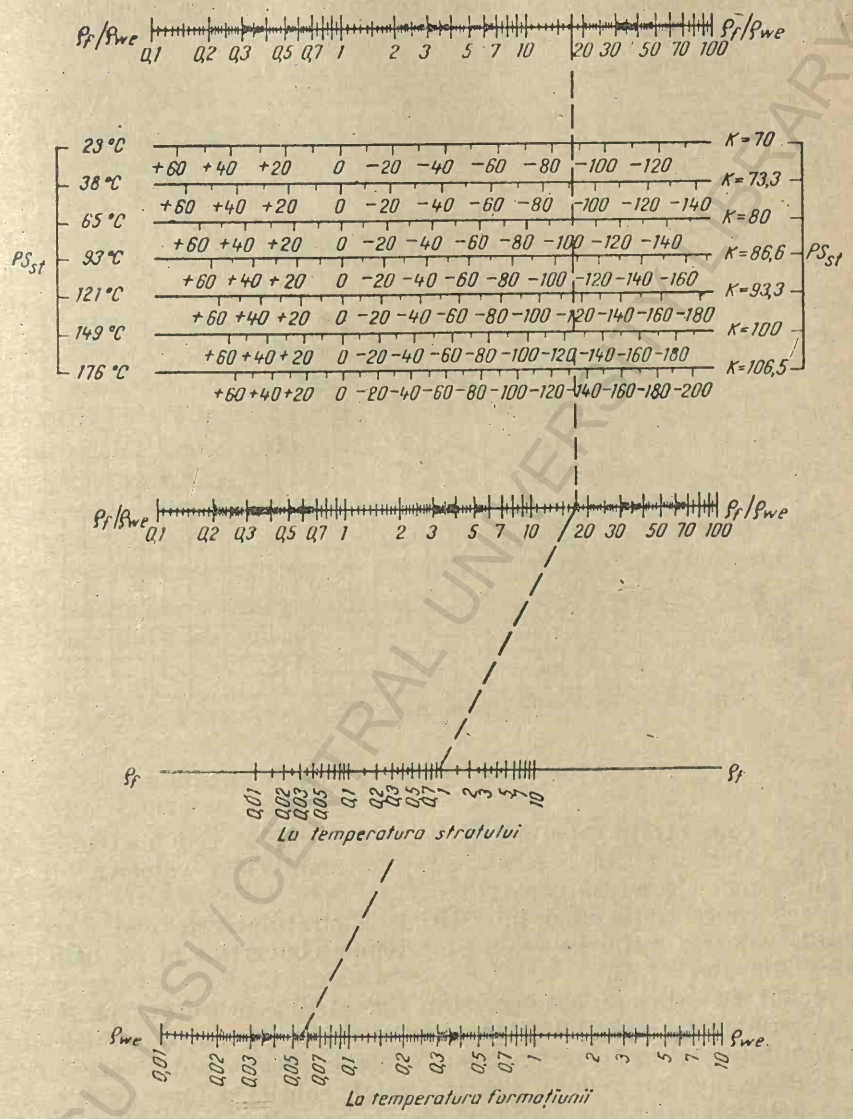


Fig. II.21. Abacă pentru determinarea lui ρ_w din PS_{st} (pentru formațiuni curate) [6].

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

care trece prin punctul corespunzător valorii ρ_f înscris pe scala ρ_f, pînă intersectează scala ρ_{we} și astfel se obține valoarea căutată ρ_{we} = =0,056 ohm · m.

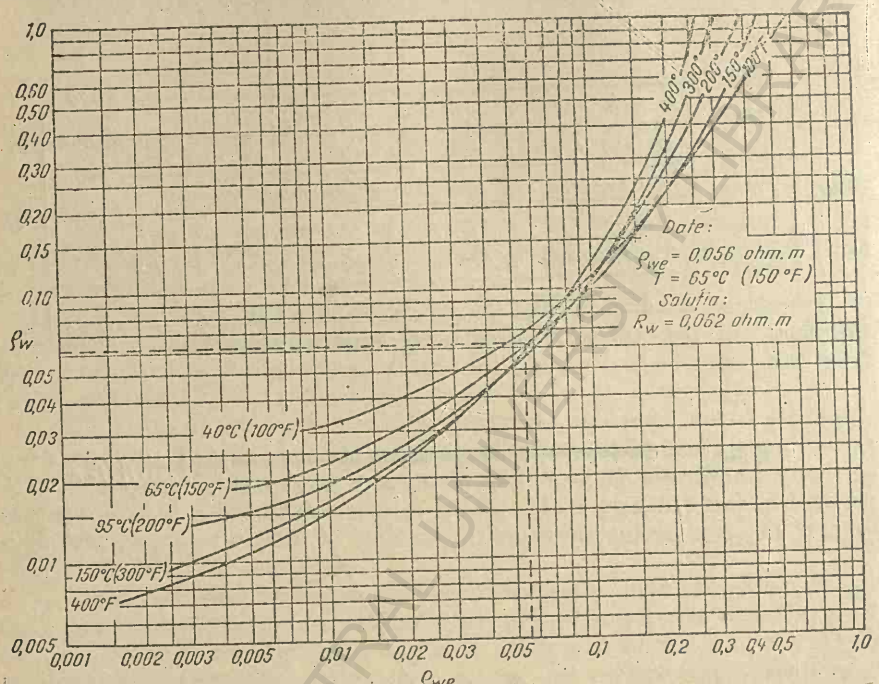


Fig. 22. Abacă pentru convertirea lui ρ_{we} în ρ_w [6].

Dacă concentrația apei interstițiale a stratului este mai mică de 10 g/l, valoarea citită pe scala ρ_{we} reprezintă chiar valoarea lui ρ_w și nu se mai efectuează convertirea.

Dacă concentrația apei interstițiale a stratului este mai mare de 10 g/l, valoarea citită pe scala ρ_{we} trebuie convertită în ρ_w utilizînd abaca din fig. II.22.

Modul de utilizare a abacei din fig. II.22 este indicat pe figură.

Determinarea rezistivității apei interstițiale ρ_w după profilele *PS* dă rezultate satisfăcătoare în cazul stratelor groase, puțin rezistive și cu zonă de invadare redusă. Pentru stratele subțiri se apreciază că precizia determinărilor este mediocră, iar în anumite cazuri (de exemplu în cazul existenței unei zone invadate adînci, al existenței ionilor de Fe, Ca ș.a.), rezultatele în majoritatea cazurilor sînt eronate. De aceea,

în cazul stratelor subțiri se recomandă ca, pe cît este posibil, să se utilizeze datele statistice din regiunea respectivă cu privire la salinitatea și rezistivitatea apelor de zăcămînt, sau chiar să se extragă probe de fluide cu testerul de la diverse nivele, în cazul sondelor de prospecțiune și exploatare.

Date suplimentare cu privire la potențialul spontan se găsesc în lucrările indicate în bibliografie [1—8].

1.5. Domeniul de aplicabilitate

În prezent, curbele *PS* sînt singurele după care se determină rezistivitatea apei care saturează porii rocilor (ρ_w). Pe curbele *PS* se stabilesc limitele stratelor, cu excepția stratelor subțiri și se pot separa formațiunile argiloase de restul formațiunilor.

În unele cazuri, curbele *PS*, în asociere cu profilele de rezistivitate aparentă, constituie repere stratigrafice foarte utile pentru rezolvarea problemelor structurale ale regiunii studiate (v. fig. II.23).

Curba *PS* este singura care arată, într-o măsură mai mare sau mai mică, dacă un strat este sau nu permeabil, îndeosebi pentru rocile curate. În cazul rocilor argiloase, curbele *PS* nu dau informații sigure asupra permeabilității stratelor.

2. METODA POTENȚIALELOR PROVOCATE (*PP*)

Prima publicație despre proprietatea rocilor de a crea potențiale datorită constatare provocate, deci despre susceptibilitatea electrică a acestora, a fost făcută în anul 1920 de C. Schlumberger. Acesta a observat că la întreruperea curentului electric furnizat de perechea de electrozi *A*, *B*, între electrozii de măsură *M*, *N* apare o diferență de potențial care descrește în unele cazuri repede, în alte cazuri lent.

Datorită instrumentelor de măsură cu sensibilitate scăzută din acea vreme și complexității fenomenelor care conduc la crearea potențialelor în cazul polarizației provocate, observația lui C. Schlumberger nu a căpătat aplicații imediate. Ulterior, susceptibilitatea electrică a rocilor a fost studiată de V. N. Dahnov și alții.

Principiul metodei potențialelor provocate a rocilor constă în studiul cîmpurilor electrice care se nasc în roci la trecerea periodică a curentului electric, cîmp care se constată în perioadele de întrerupere a curentului [1].

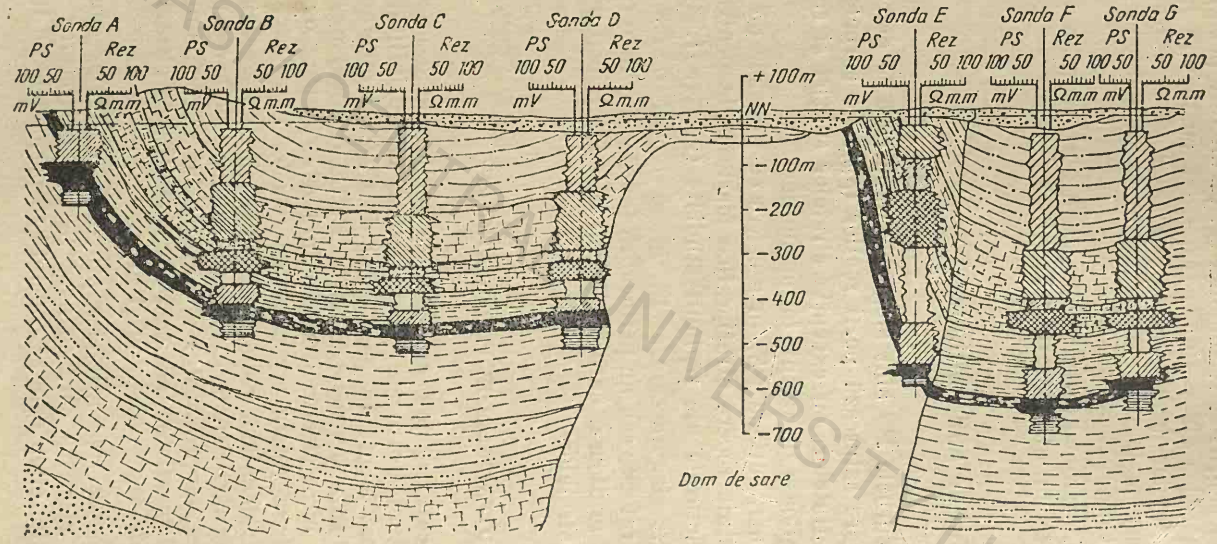


Fig. II.23. Repere stratigrafice stabilite pe profilele *PS* și de rezistivitate aparentă.

BCU IAȘI - COLECȚIA UNIVERSITARĂ - LIBRARY

Prin experienţe s-a stabilit că rocile polarizează* la trecerea curentului electric, iar în momentul întreruperii curentului se creează în spaţiul înconjurător un cîmp electric. Potenţialele care iau naştere în momentul întreruperii curentului electric au fost denumite potenţiale de polarizare provocată a rocilor sau, prescurtat, *potenţiale provocate* (*PP*). Sub influenţa curentului electric, la suprafaţa rocilor se produc o serie de procese fizico-chimice din care fac parte: polarizarea de electrod, oxidarea, reducerea, electroosmoza, polarizarea volumetrică, capacitatea electrică a rocilor şi polarizarea de concentraţie a soluţiilor care saturează roca şi vin în contact cu ea. Complexul proceselor fizico-chimice enumerate constituie activitatea electrochimică provocată a rocilor.

Caracterul şi intensitatea fenomenelor enumerate depind de proprietăţile fizice şi chimice ale rocilor, de caracteristicile litologice şi proprietăţile mineralogice ale acestora, precum şi de compoziţia chimică a soluţiilor care saturează porii rocilor.

Dintre procesele fizico-chimice care contribuie într-o măsură mai mare la creearea potenţialelor provocate sînt: polarizarea de electrod, oxidarea, reducerea şi electroosmoza. În prezent metoda potenţialelor provocate se utilizează sporadic, cedînd locul metodelor nucleare. Date complete despre această metodă se găsesc în alte lucrări [1, 8, 9, 10, 11].

3. METODA POTENŢIALULUI GRADIENT

Principiul metodei constă în a înregistra diferenţa de potenţial static între electrozii *M* şi *N* ai dispozitivului de măsură cînd aceştia sînt apropiaţi unul de altul. Obişnuit, distanţa este de 0,1 m pînă la 1 m.

Metoda potenţialului gradient s-a folosit în special la cercetarea sondelor săpate pentru explorarea zăcămintelor de cărbuni şi minereuri metalifere, deoarece permitea separarea mai exactă a limitelor stratelor. În prezent, această metodă nu se mai foloseşte, cedînd locul microdispozitivelor.

BIBLIOGRAFIE

1. Dahnov, V. N. **Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă**, Bucureşti, Editura tehnică, 1961, pp. 40—51.

* Prin termenul de *polarizare* se înţelege separarea de sarcini astfel încît să se formeze o distribuţie de dipoli efectivă într-un mediu oarecare, deci polarizarea provocată include o serie de fenomene bazate pe separări de sarcini provocate de un cîmp electric exterior, aplicat mediului respectiv.

2. Pirson, Sylvain, I. **Handbook of Well Log Analysis**, Ed. 1963, pp. 67, 72—74.
3. Wyllie, R. M. I. **Bazele interpretării profilelor electrice ale sondelor**, Bucureşti, Editura tehnică, 1959, pp. 58—60, 308—310.
4. Gheorghiu, F. **Denaturarea profilelor de polarizaţie naturală**. Comunicare la al patrulea simpozion de prospecţiuni geofizice şi fizica scoarţei globului în România, din cadrul Academiei R.S.R. 5—7 iulie 1966.
5. **Schlumberger Well Surveying Corp.** Documente nr. 3, 4 şi 7.
6. **Loganalysis Handbook**, P.G.A.C., 1966.
7. **Portable Electro-Logger type El-50 Eastman International company G.M.B.H.** Hanover, 1966.
8. Tănăsescu, P. , Rădulescu, M., Doicin, D., Roşca, V., Enescu, D., Cîndea I., Constantinescu, P., Barbu, M. **Prospecţiuni geofizice**, Bucureşti, Editura tehnică, 1965, vol. II, pp. 113—126.
9. Marschall, D. J., Madden, T. R., **Induced Polarization, Study of ist Causes Gephysics**, V. XXIV, nr. 3, 1959.
10. Siegel, H. O. **Mathematical Formulation and Type Curves for Induced Polarization Geophysics**. V. XXIV, nr. 3, 1959.
11. Meier, B. A. **Karotaj skvajin pri razdvedke polimetallicceskih mestorojdneii.** Izdatelistvo Leningradskogo Universiteta 1960, pp. 105—114.
12. Schlumberger. **Log Interpretation principles**, 1966.

BCU IAŞI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CAPITOLUL III

DIAGRAFII CLASICE DE REZISTIVITATE

În stadiul actual al dezvoltării geofizicii de sondă, metodele de investigare a găurilor de sondă prin măsurarea rezistivității aparente a rocilor cu dispozitive potențiale (normale) și gradiente (laterale), respectiv o combinație de curbe potențiale și gradiente, la care se adaugă și curba potențialului spontan sînt denumite diagrafii clasice de rezistivitate aparente. Din categoria acestor metode fac parte:

— diagrafia electrică obișnuită;
— diagrafia electrică laterală sau B.K.Z;
— diagrafia electrică laterală pentru roci carbonatate.

Deoarece aceste metode au fost descrise în numeroase publicații de specialitate, cu excepția diagrafiei electrice laterale pentru roci carbonatate, se va face numai o scurtă prezentare a principiului metodei privind măsurarea rezistivității aparente a rocilor, a dispozitivelor, a curbelor caracteristice și a diverselor variante de diagrafii electrice obișnuite.

Diagrafia electrică laterală sau B.K.Z., descrisă pe larg în lucrarea „Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă" de V. N. Dahnov, apărută în Editura tehnică în 1961, nu va fi prezentată.

Principalele lucrări în care s-a tratat despre diagrafiile clasice de rezistivitate sînt indicate la bibliografie [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

1. PRINCIPIUL DETERMINĂRII REZISTIVITĂȚII APARENTE PRIN DIAGRAFII CLASICE DE REZISTIVITATE

Primele măsurători de rezistivitate aparentă au fost executate de frații Schlumberger, Conrad și Marcel, în anul 1927.

Principial, teoria investigării găurii de sondă prin măsurarea rezistivității aparente a rocilor, constă în măsurarea unei diferențe de potențial ΔV într-un cîmp electric creat în mediul de interes, ca urmare a trecerii unui curent alternativ de intensitate constantă I. Legătura

dintre rezistivitatea mediului ρ, diferența de potențial ΔV și intensitatea curentului I este redată de relația:

$$\rho = K\Delta V/I \quad [\text{în ohm·m}]. \tag{III.1}$$

Circulația curentului electric de la electrozii de curent la formațiune se face prin fluidul de foraj. Ca urmare, diagrafiile clasice de rezistivitate nu pot fi executate în găuri de sonde forate cu fluid foarte conductiv (de exemplu cu fluid avînd salinitate mai mare de 60 g/l), sau cu fluid foarte rezistiv (fluid pe bază de produse petroliere). De asemenea, diagrafiile clasice nu pot fi executate în foraje săpate cu aer comprimat.

Rezistivitățile formațiunilor variază între 0,2 și 1 000 ohm·m. În formațiuni poroase și permeabile rezistivități mai mari de 1 000 ohm·m practic nu se întîlnesc.

2. DISPOZITIVUL POTENȚIAL (NORMAL)

La acest dispozitiv, electrozii care îndeplinesc aceeași funcție sînt depărtați, după cum este arătat în fig. III.1.

Sînt două tipuri de dispozitive potențiale: simple și multiple. Cu dispozitivul simplu (fig. III.1, *a*) se poate înregistra o singură curbă normală (obișnuit $\overline{AM}=0{,}3$ m), iar cu dispozitivul multiplu se înregistrează simultan pînă la trei curbe normale și anume: normala scurtă avînd $\overline{AM}=0{,}4$ m (16 in), normala intermediară avînd $\overline{AM}=0{,}96$ m (38 in) și normala lungă avînd $\overline{AM}=1{,}6$ m (64 in).

Schema principială de măsurare a curbelor potențiale (normale) este prezentată în fig. III.2.

Electrozii de curent A și B se alimentează fie cu un curent pulsat, fie cu curent alternativ de joasă frecvență (20 Hz pînă la 200 Hz). Electrodul de curent B este îndepărtat de A cu de minimum 7 ori distanța $\overline{AM}$ (lungimea dispozitivului).

Electrodul de măsură M este situat în apropierea electrodului A, iar al doilea electrod de măsură N este plasat foarte departe (la infinit). Diferența de potențial $\Delta V_{\overline{MN}}$, măsurată între electrozii de măsură M și N, este proporțională cu rezistivitatea mediului. Pentru demonstrare se presupune mediul omogen și izotrop. Fie I curentul emis prin electrodul de curent A, între sferele de raze r și $r+dr$ (v. fig. III.2); în acest caz există relația:

$$\Delta V = \rho_A \frac{dr}{4\pi r^2} \cdot I. \tag{III.2}$$

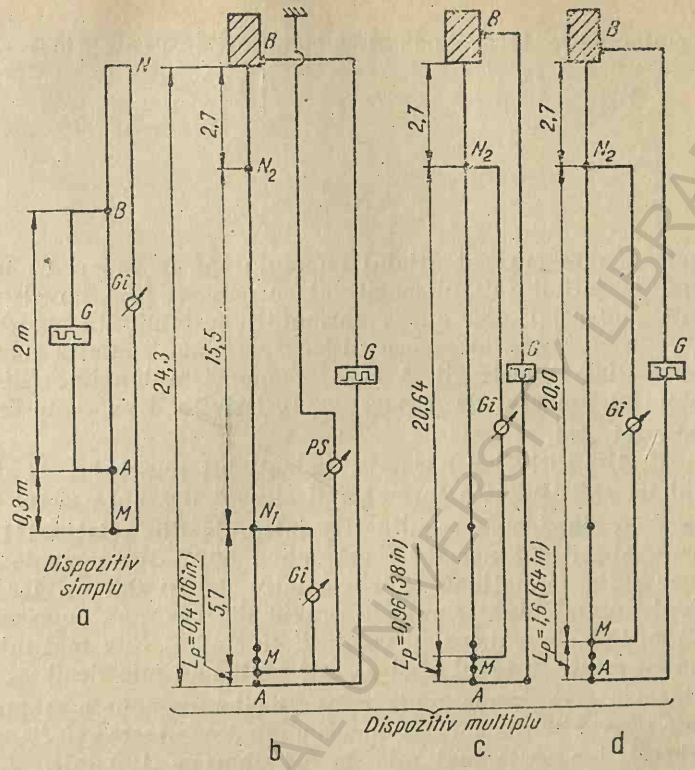


Fig. III.1. Dispozitivc potențiale:
a — dispozitiv potențial (normal) obișnuit (L_p =0,3 m); *b* — dispozitiv potențial (normal) scurt (L_p =0,4 m=16 in); *c* — dispozitiv potențial (normal) intermediar (L_p =0,96 m=38 in); *d* — dispozitiv potențial (normal) lung (L_p=1,6 m=64 in).

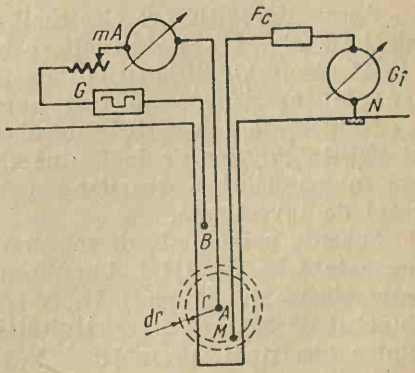


Fig. III.2. Schema principială de măsură a rezistivității aparente utilizînd dispozitiv potențial:
A, *B* — electrozi de curent; *M*, *N* — electrozi de măsură; *G* — generator de curent; *mA* — miliampermetru; F_c — filtru pentru curent continuu; G_l — galvanometru înregistrator.

BIBLIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITARY LIBRARY

Integrînd relația III.2 de la $\overline{AM}$ la infinit (N) se obține:

$$V_{\overline{MN}} = \int_{\overline{AM}}^{\infty} \rho_A \frac{dr}{4\pi r^2} I = \rho_A \frac{I}{4\pi} \left| \frac{I}{r} \right|_{\overline{AM}}^{\infty} = \rho_A \frac{I}{4\pi \overline{AM}} \qquad \text{(III.3)}$$

sau

$$\rho_A = K \frac{\Delta V_{\overline{MN}}}{I}. \qquad \text{(III.4)}$$

Întrucît se măsoară potențialul punctului M în raport cu un electrod situat la infinit (N), dispozitivul cu care se face înregistrarea a fost numit „potențial", iar curba obținută a fost numită „potențială". În S.U.A., Franța etc., asemenea dispozitive sînt denumite „normale".

Distanța dintre electrozii A și M se numește lungimea dispozitivului potențial. Punctul de măsurare a rezistivității aparente este mijlocul distanței $\overline{AM}$.

În cazul dispozitivelor normale, potențialul punctului M depinde în general de rezistivitatea formațiunii situată deasupra sferei a cărei rază este $\overline{AM}$, după cum rezultă din integrala din relația III.3.

Pentru dispozitivul normal scurt, circa 50% din semnale provin dintr-o zonă din formațiune cuprinsă între 0,4 și 0,8 m, iar pentru dispozitivul normal lung semnalele provin dintr-o zonă cuprinsă între 1,6 la 3,2 m. Cele de mai sus au valabilitate cînd ρ_n este mai mic decît ρ_r însă nu cu mult. În cazul cînd ρ_n este mult mai mic decît ρ_r, atunci noroiul influențează foarte mult măsurătorile, reducîndu-se procentul de semnale provenite din formațiune, ajungînd ca acestea să fie aproape inexistente cînd ρ_n este mai mic de 0,1 ohm·m (100 g/l).

3. DISPOZITIVUL GRADIENT (LATERAL)

Acest dispozitiv are electrozii care îndeplinesc aceeași funcție apropiați (v. fig. III.3). Întrucît se măsoară gradientul de potențial între acești electrozi, dispozitivul de măsurare s-a denumit „gradient", iar curbele înregistrate au fost numite „gradiente".

Numele de dispozitiv „lateral" și curbă „laterală" utilizat în S.U.A. și Franța provine de la faptul că porțiunea din formațiune măsurată are în majoritatea cazurilor o extindere laterală ca urmare a creșterii razei de investigare.

Schema principială de măsurare a curbelor gradiente (laterale) este prezentată în fig. III.4. Lungimea dispozitivului gradient este distanța între electrozii apropiați M, N (A, B) și electrodul îndepărtat A (M). Punctul de măsură a rezistivității aparente este la mijlocul distanței dintre electrozii apropiați: $MN(AB)$.

Ca și în cazul dispozitivului potențial se poate stabili proporționalitatea între diferența de potențial și rezistivitatea formațiunilor:

$$\rho_A = K' \frac{\Delta V'_{MN}}{I'}. \qquad \text{(III.5)}$$

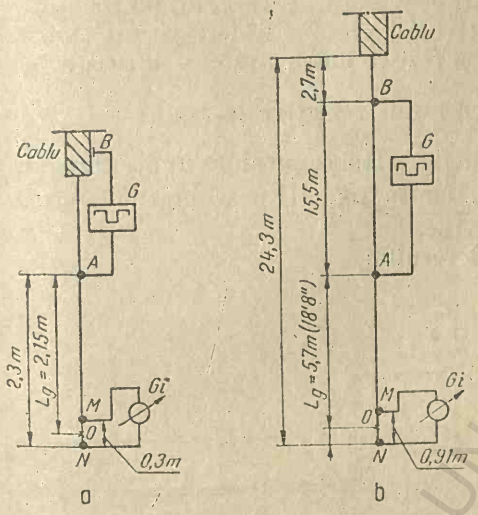


Fig. III.3. Dispozitive gradiente uzuale:
a — dispozitiv gradient clasic; *b* — dispozitiv gradient lung.
A, *B* — electrozi de curent; *M*, *N* — electrozi de măsură; G_f — generator de curent; G_i galvanometru înregistrator.

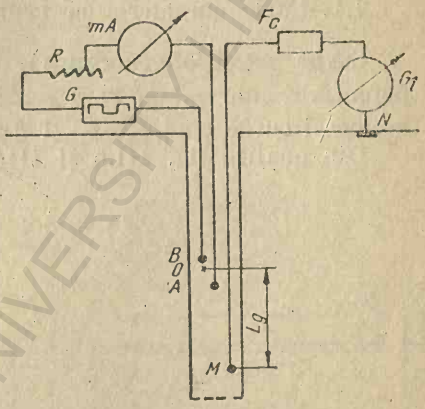


Fig. III.4. Schema principială de măsură a rezistivității aparente utilizînd dispozitiv gradient:
A, *M* — electrozi de curent; *M*, *N* — electrozi de măsură; *G* — generator de curent; *R* — reostat; *mA* — miliampermetru; F_c — filtru pentru curent continuu; G_f — galvanometru înregistrator.

În cazul dispozitivelor gradiente (laterale), semnalele provin de la o distanță aproximativ egală cu lungimea dispozitivului și nu dincolo de această distanță. De exemplu, pentru un dispozitiv gradient avînd lungimea de 5,4 m, semnalele provin dintr-o zonă cuprinsă între 4 și 5 m și aceasta pentru strate cu o grosime mai mare decît lungimea dispozitivului și cînd ρ_n este ceva mai mic decît ρ_r. Pe măsură ce rezistivitatea fluidului de foraj scade se reduce și numărul semnalelor provenite din formațiune.

4. CURBE CARACTERISTICE

Valorile de rezistivitate citite pe diagrafii sînt rezistivități aparente, deoarece în măsurătoare se cuprind valorile rezistivităților noroiului,

POLITEHNICA UNIVERSITY LIBRARY

turtei, zonei spălate, zonei invadate, zonei necontaminate și a stratelor adiacente. Măsurătoarea este influențată mult și de geometria dispozitivului, care poate denatura alura curbei.

Forma curbelor potențiale și gradiente teoretice în medii omogene și izotrope precum și în medii reale fără zonă de invadare depinde de tipul, lungimea și constanta dispozitivului de măsură, de raportul dintre grosimea stratului și lungimea dispozitivului, precum și de raportul dintre rezistivitatea stratului cercetat ρ_2 și rezistivitatea stratelor adiacente ρ_1.

4.1. Curbe caracteristice pentru strate rezistive ($\rho_2 > \rho_1$)

Curbe potențiale (normale). În fig. III.5 se prezintă forma curbelor potențiale cînd $\rho_2 > \rho_1$ și $h \gg \overline{AM}$, iar în fig. III.6 se prezintă forma aceloraşi curbe cînd $\rho_2 > \rho_1$ și $h \leqslant \overline{AM}$.

Din analiza fig. III.5 și III.6 rezultă:

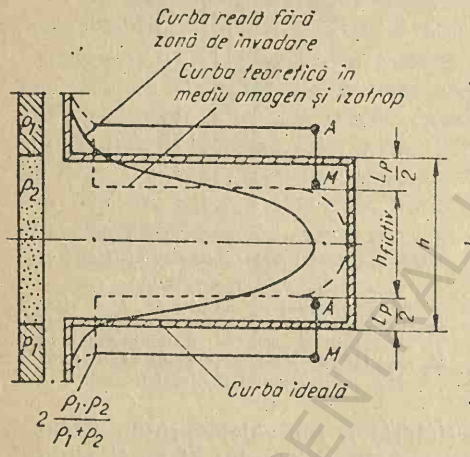


Fig. III.5. Aspectul curbei de rezistivitate aparentă potențială pentru strate groase ($h > \overline{AM}$), cînd $\rho_2 > \rho_1$.

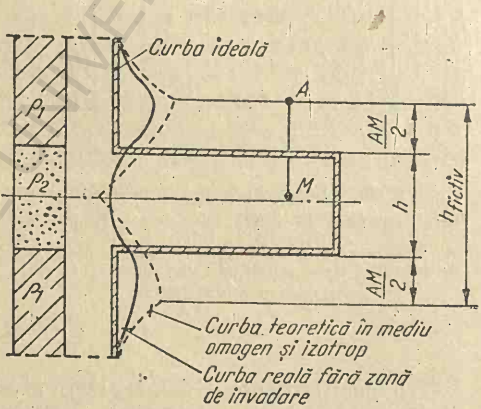


Fig. III.6. Aspectul curbei de rezistivitate aparentă potențială pentru strate subțiri ($h \leqslant AM$), cînd $\rho_2 > \rho_1$.

— curbele potențiale sînt simetrice față de planul median orizontal;

— grosimea stratelor groase rezistive avînd $h > \overline{AM}$ apare pe diagramă mai mică cu o lungime a dispozitivului:

$$h = h_{fictiv} + L_p; \qquad \text{(III.6)}$$

— grosimea stratelor subțiri rezistive avînd $h < \overline{AM}$ este dificil de determinat pe curbele potențiale;

— stratele subțiri rezistive sînt puse în evidență printr-un minim de rezistivitate aparentă (deși stratul este rezistiv), ceea ce reprezintă un dezavantaj al acestui dispozitiv;

— rezistivitatea aparentă a stratelor groase rezistive înregistrate în medii reale este mai mică decît rezistivitatea reală.

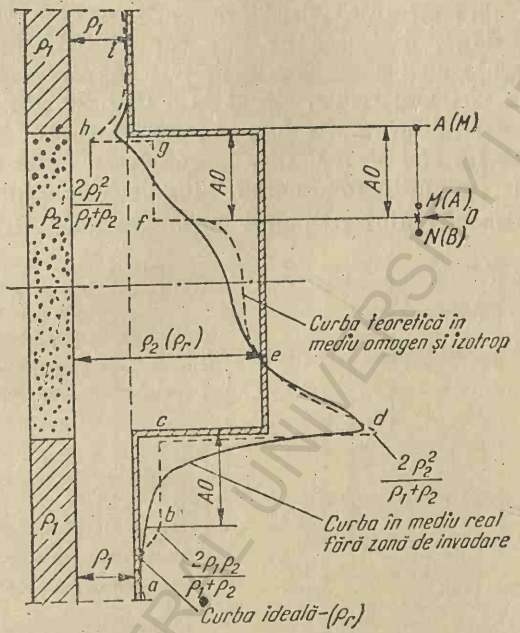


Fig. III.7. Aspectul curbei de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv gradient consecutiv pentru strate groase ($h > AO$), cînd $\rho_2 > \rho_1$.

Curbe gradiente. În fig. III.7 se prezintă forma curbelor gradiente cînd $\rho_2 > \rho_1$ și $h > \overline{AO}(\overline{MO})$, iar în fig. III.8 se prezintă forma acelorași curbe cînd $\rho_2 > \rho_1$ și $h \leqslant \overline{AO}(\overline{MO})$.

Din analiza fig. III.7 și III.8 rezultă:

— spre deosebire de curbele potențiale, curbele gradiente nu sînt simetrice în raport cu planul median al stratului și configurația lor este considerabil mai complexă;

— pentru stratele rezistive groase $h > \overline{AO}(\overline{MO})$, limita superioară a stratului nu este bine definită pe curbele obținute cu dispozitive gradiente (consecutive) și în general stratul pare a fi deplasat în jos; mărimea deplasării în jos a stratului este aproximativ egală cu lungimea

dispozitivului $\overline{AO}$; limita inferioară a stratului este bine evidențiată printr-un maxim de rezistivitate a cărui valoare este mai mare decît rezistivitatea reală și egală cu $2\rho_2^2/\rho_1+\rho_2$;

— stratele rezistive subțiri $h<\overline{AO}$ sînt evidențiate printr-o creștere bruscă de rezistivitate aparentă, care este totuși mai mică decît rezistivitatea reală a stratului; deasupra acoperișului stratului se observă o ușoară depresiune, dar ceea ce este caracteristic pentru asemenea curbe este prezența unei zone cu o rezistivitate mică sub strat, urmată de un al doilea vîrf mai redus, situat la o distanță egală cu lungimea dispozitivului $\overline{AO}$ măsurată de la culcușul stratului. Vîrful fictiv de mai sus se numește *vîrf de reflecție*, iar zona cu o rezistivitate aparentă foarte mică este denumită *zonă oarbă*. Lungimea zonei oarbe este egală cu lungimea dispozitivului $\overline{AO}$, mai puțin grosimea stratului rezistiv.

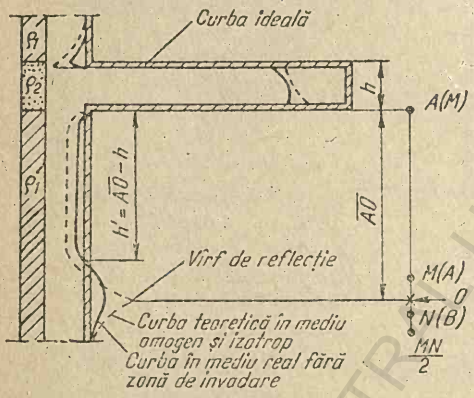


Fig. III.8. Aspectul curbei de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv gradient consecutiv pentru strate subțiri ($h<\overline{AO}$), cînd $\rho_2>\rho_1$.

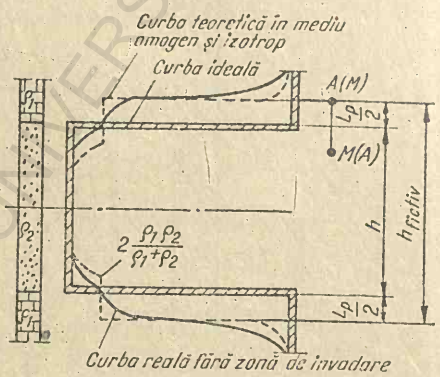


Fig. III.9. Aspectul curbei de rezistivitate aparentă potențială pentru strate groase sau subțiri cînd $\rho_2<\rho_1$.

4.2. Curbe caracteristice pentru strate conductive ($\rho_2<\rho_1$)

Curbe potențiale. În fig. III.9 se prezintă forma curbelor potențiale cînd $\rho_2<\rho_1$ și $\overline{AM}<h<\overline{AM}$.

Din analiza figurii se constată că atît pentru strate groase cît și pentru strate subțiri conductive, grosimea acestora apare pe diagramă mai mare cu o lungime a dispozitivului

$$h=h_{fictiv}-L_p \qquad \text{(III.7)}$$

și sînt simetrice în raport cu planul median orizontal.

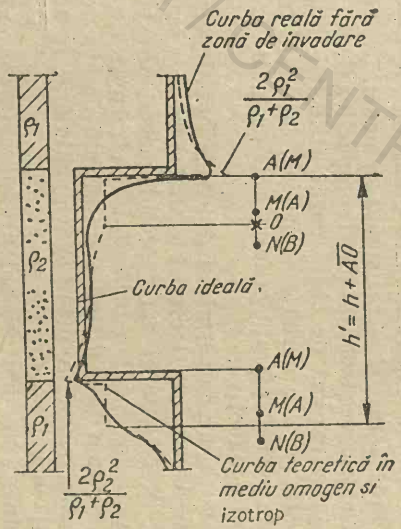


Fig. III.10. Aspectul curbei de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv gradient consecutiv pentru strate groase ($h > \overline{AO}$), cînd $\rho_2 < \rho_1$.

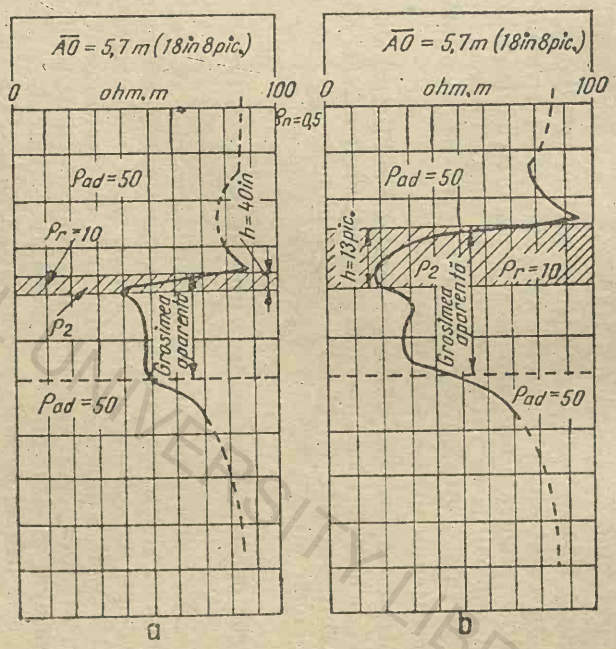


Fig. III.11. Aspectul curbei de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv gradient consecutiv pentru strate subțiri ($h < \overline{AO}$), cînd $\rho_2 < \rho_1$:
a — cînd *h*=40 m;
b — cînd *h*=13 pic. [6]

BCU IASI CENTRALA DE CARTE VECHE LIBRARY

Curbe gradiente. În fig. III.10 se prezintă forma curbelor gradiente cînd $\rho_2 < \rho_1$ și $h \gg \overline{AO}(\overline{MO})$, iar în fig. III.11, *a* și *b*, se prezintă forma aceloraşi curbe cînd $\rho_2 < \rho_1$ și $h \leqslant \overline{AO}(\overline{MO})$.

Din analiza figurilor III.10 și III.11. *a* și *b*, rezultă:

— atît în cazul stratelor groase cît și în cazul stratelor subțiri, aspectul curbei gradiente este asimetric în raport cu planul median al stratului și anomaliile se extind în jos, în afara limitelor inferioare. Creşterea aparentă a grosimii stratului este aproximativ egală cu lungimea dispozitivului utilizat $\overline{AO}(\overline{MO})$;

— rezistivitatea stratelor adiacente stratelor subțiri conductive este reprezentată prin valori mai mari decît rezistivitatea reală (ρ_r a stratelor adiacente din fig. III.11 este de 50 ohm·m, iar pe diagramă ρ_A=80—90 ohm·m).

4.3. Curbe caracteristice pentru strate foarte rezistive

În fig. III.12 sînt reprezentate aspectele curbelor de rezistivitate aparentă normale și laterale în faţa unei formaţiuni groase foarte rezistivă, de exemplu un calcar conţinînd zone mai conductive poroase.

În cazul acestor formaţiuni curentul emis de electrodul A pătrunde foarte puţin în strat, restul circulînd în lungul găurii de sondă în două direcţii, deasupra şi dedesubtul electrodului de curent A. Rezistenţa fiecărei căi este determinată de produsele l_1R şi l_2R, (în care l_1 reprezintă lungimea căii superioare prin care circulă curentul electric cuprins între electrodul A şi prima zonă superioară mai conductivă; l_2 — lungimea căii inferioare cuprinsă între electrodul A şi prima zonă mai conductivă inferioară; R — rezistenţa coloanei de noroi). Împărţirea curentului electric se face în părţi proporţionale cu rezistenţa celor două căi. Aşa se explică de ce în cazul utilizării unui dispozitiv gradient se înregistrează o curbă nesimetrică, iar amplitudinea maximă a anomaliei este mult deplasată în jos şi este de multe ori situată în dreptul zonei mai conductive.

Aspectul curbelor potenţiale depinde de poziţia electrodului N faţă de electrodul M. În cazul cînd electrodul N se găseşte la o distanţă infinită faţă de electrodul M, aspectul curbei potenţiale este simetric în raport cu planul median orizontal al stratului. În cazul cînd electrodul N este situat la o distanţă finită faţă de electrodul M, aspectul curbei este asimetric şi are o formă triunghiulară. În acest caz, aspectul nesimetric al curbei potenţiale se explică în mod asemănător ca mai sus. Electrodul N nu mai are potenţialul zero, aşa cum se întîmplă în cazul stratelor cu rezistivitate finită şi în acest caz se măsoară căderea de potenţial între electrozii M şi N şi nu între electrozii A şi M, deoarece

curentul electric circulă prin coloana de noroi în modul descris mai înainte.

Direcția asimetriei curbei potențiale depinde de modul cum electrozii M și N sînt asociați deasupra sau dedesubtul electrodului de curent A. În cazul din fig. III.12, amplitudinea maximă a anomaliei

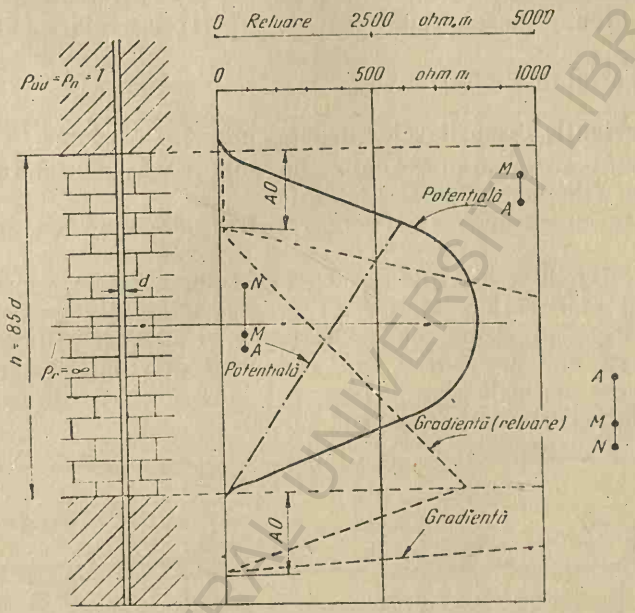


Fig. III.12. Aspectul curbelor de rezistivitate aparentă normale și laterale în dreptul stratelor cu rezistivitate foarte mare [11].

este mult deplasată în sus și este situată în apropierea zonei mai conductivă, electrozii M și N fiind deasupra electrodului de curent A. În rezumat, curbele potențiale și gradiente înregistrate în formațiuni foarte rezistive, în cuprinsul cărora se găsesc și zone conductive subțiri, sînt de formă mai mult sau mai puțin triunghiulară.

5. VARIANTE ALE METODEI ELECTRICE CLASICE

După numărul curbelor de rezistivitate aparentă înregistrate (normale și laterale) se diferențiază metodele electrice clasice. Nominalizarea variantelor se va face prin inițialele curbelor înregistrate, în

ordinea înscrierii lor în pistele diagramei*. Inițialele cu care se nominalizează diversele variante ale investigării electrice clasice caracterizează și dispozitivul utilizat.

Exemplu. În prima pistă a diagramei s-a înregistrat curba PS, în pista din mijloc două curbe normale și în pista a treia o curbă normală și una laterală. Varianta va fi numită prescurtat: P-2N-NL (potențialul spontan — două normale — o normală și o laterală, v. fig. III.16).

5.1. Varianta P-2N-L

Dimensiunile dispozitivelor uzuale sînt: $\overline{AM}$=0,4 m (16 in) — normala scurtă; $\overline{AM}$=1,6 m (64 in) — normala lungă; $\overline{AO}$=5,4 m (18 pic) sau 5,7 m (18 pic și 8 in) — laterală.

1. Cazul succesiunii de strate rezistive alternînd cu strate puțin rezistive.

În fig. III.13 se prezintă aspectul curbelor normale, scurte și lungi, precum și al curbelor laterale în dreptul unui strat rezistiv subțire situat într-o formațiune cu rezistivitate redusă. (Grosimea stratului rezistiv este mai mare decît lungimea dispozitivului cu care s-a înregistrat curba normală scurtă însă mai mică decît a dispozitivului cu care s-a înregistrat curba normală lungă).

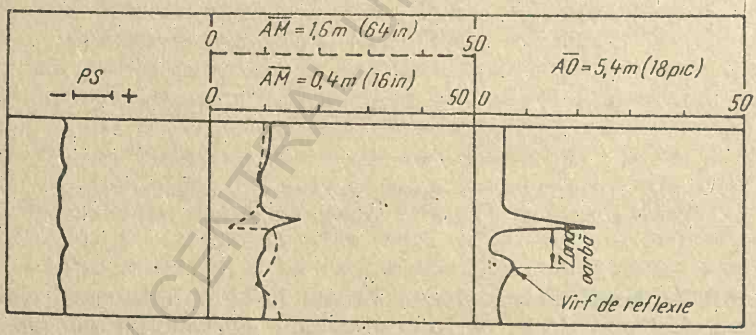


Fig. III.13. Strat subțire și rezistiv situat într-o formațiune puțin rezistivă. Înregistrare cu dispozitiv P-2N-L.

În cazul succesiunii de strate subțiri rezistive situate la distanțe mici unele de altele, interpretarea se complică. Acest lucru este exemplificat în fig. III.14. Depresiunea de pe curba laterală din dreptul stratului permeabil *b* se poate datora zonei oarbe provocată de stratul rezis-

* O diagramă înregistrată cu dispozitive simple are două piste, iar o diagramă înregistrată cu dispozitive multiple are trei piste.

tiv superior, *a*, dar s-ar putea datora și grosimii stratului *b*, care este aproximativ egală cu lungimea dispozitivului gradient. Mai jos, curbele normale, scurtă și lungă, indică o serie de depresiuni și vîrfuri din care o parte nu ar putea fi interpretate fără ajutorul curbei laterale. De

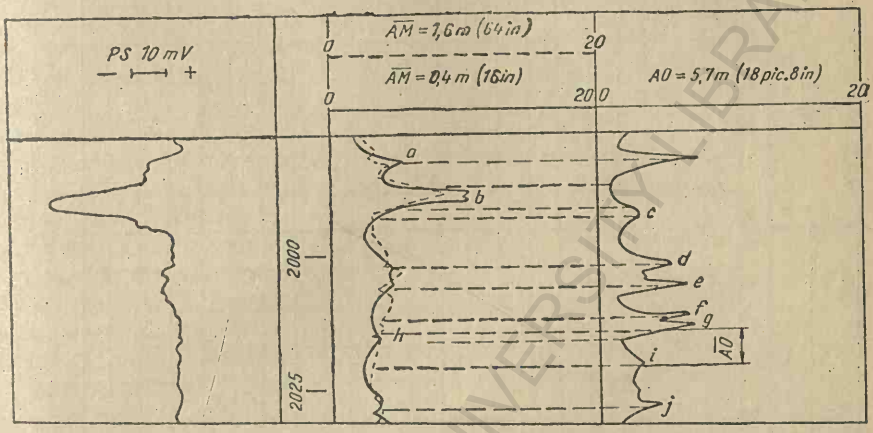


Fig. III.14. Strate subțiri rezistive situate la distanțe mici unele de altele într-o formațiune marnoasă. Înregistrare cu dispozitiv P-2N-L.

exemplu, pe curba laterală vîrfului *i* este evident un vîrf de reflecție corespunzător stratului rezistiv *g*, deoarece este separat de acesta cu o distanță egală cu lungimea dispozitivului $\overline{AO}$. Vîrful *h*, evidențiat pe curbele normale (prin minim pe normala lungă și prin maxim pe normala scurtă), nu este evidențiat pe curba laterală, deoarece el se află în interiorul zonei oarbe creată de stratul rezistiv *g*.

2. Cazul nisipurilor și gresiilor cu apă dulce, apă sărată și petrol (v. fig. III.15). Stratul din dreptul intervalului 2020—2010 m este un strat cu apă dulce, deoarece anomalia de pe curba potențialului spontan are amplitudine pozitivă, depășind linia de bază a marnelor. Datorită invaziei cu filtrat a cărui rezistivitate este mai mică decît rezistivitatea apei ce saturează stratul, rezistivitatea aparentă măsurată pe curba normală scurtă (13 ohm·m) este mai mică decît rezistivitatea aparentă măsurată pe curba normală lungă (19 ohm·m), iar rezistivitatea aparentă măsurată pe curba laterală are rezistivitatea cea mai mare (25 ohm·m).

Stratul din dreptul intervalului 2 050—2 030 m este evident un strat cu apă sărată, deoarece rezistivitatea aparentă măsurată pe curba laterală este mai redusă decît rezistivitatea marnelor. În plus, pe măsură

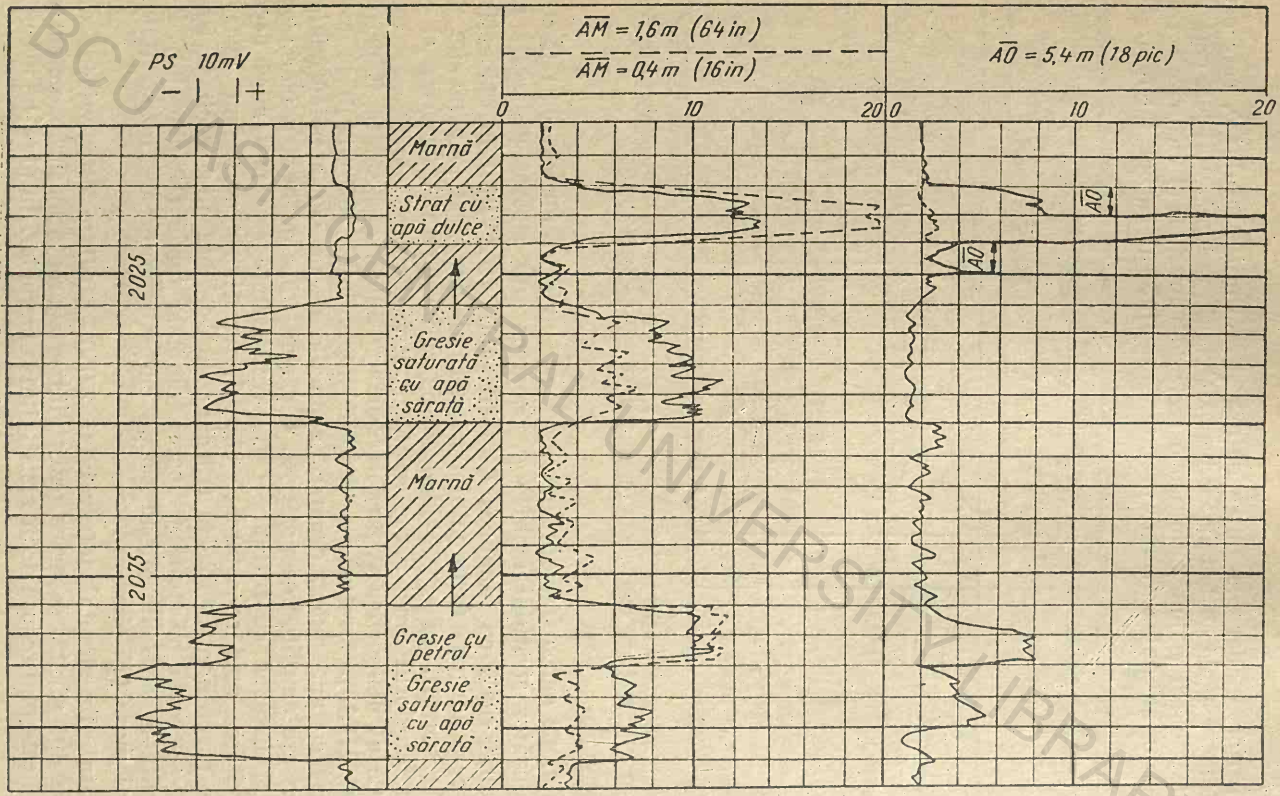


Fig. III.15. Strate conţinînd apă dulce, apă sărată şi hidrocarburi. Înregistrare cu dispozitiv P-2N-L.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

ce lungimea dispozitivului potențial crește, scade și rezistivitatea aparentă măsurată pe curba corespunzătoare.

Stratul din dreptul intervalului 2 105—2 080 m este un strat gros, conținînd la partea superioară hidrocarburi (2 090—2 080 m), iar la partea inferioară apă sărată (2 105—2 090 m). Se apreciază că la partea superioară stratul menționat conține hidrocarburi, deoarece rezistivitatea aparentă măsurată pe curba normal lungă (12 ohm · m) este mai mare decît rezistivitatea aparentă măsurată pe curba normal scurtă (10 ohm · m), iar rezistivitatea aparentă măsurată pe curba laterală (8 ohm · m) este suficient de mare pentru a caracteriza stratul ca fiind petrolifer.

5.2. Varianta P-2N-NL

Dimensiunile dispozitivelor uzuale sînt: $\overline{AM}$ —0,4 m (16 in) — normala scurtă; $\overline{AM}$=0,96 m (38 in) — normala intermediară; $\overline{AM}$ = 1,6 m (64 in) — normala lungă; $\overline{AM}$ = 5,4 m (18 picioare) — curba laterală.

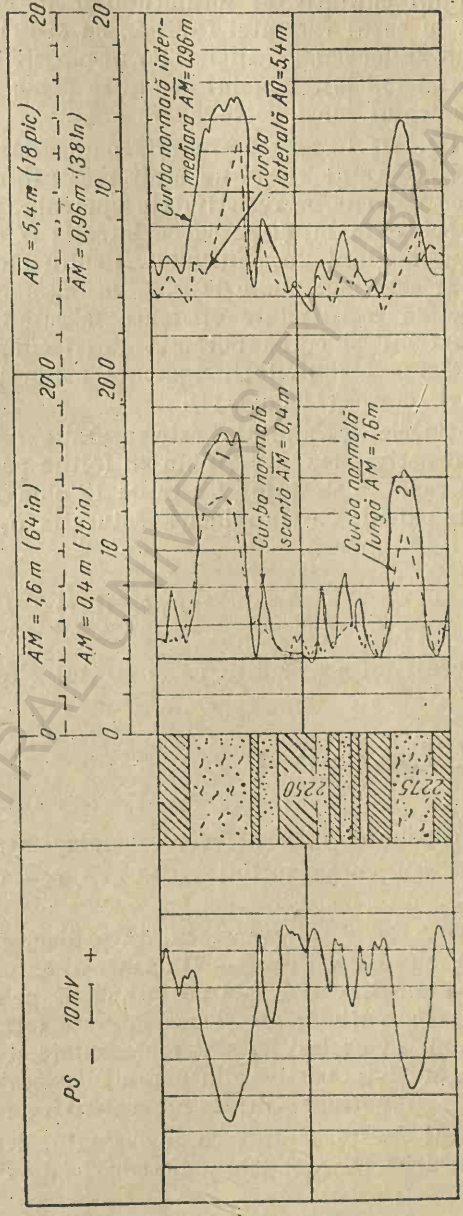


Fig. III.16. Succesiunea de strate nisipoase și argiloase. Înregistrare cu dispozitiv P-2N-NL.

CENTRAL LIBRARY

Studiul calitativ al formațiunilor în cazul variantei P-2N-NL se face ca în cazul variantei P-2N-L, cu deosebirea că se înregistrează o a treia curbă normală, utilizînd un dispozitiv normal a cărui lungime este de 0,96 m (38 in). În felul acesta se poate face o apreciere mai exactă a diametrului zonei de invadare (d_{zi}).

În fig. III.16 este prezentată o diagrafie înregistrată cu dispozitiv P-2N-NL. Stratul *2* este un strat gros saturat cu apă sărată și aceasta deoarece valorile de rezistivitate aparentă, măsurate pe curba normală lungă (11 ohm·m) și pe curba laterală (7 ohm·m) descresc pe măsura creșterii lungimii dispozitivului. Pentru stratul *2*, diametrul zonei de invadare este mai mare de 0,96 m însă mai mic de 1,6 m, deoarece valorile de rezistivitate aparentă măsurate pe curba normală scurtă (14 ohm·m) și curba normală intermediară (14 ohm·m) sînt egale, iar valoarea rezistivității aparente măsurate pe curba normală lungă este mai redusă (11 ohm·m).

Considerînd că stratul *2* este saturat sută la sută cu apă de zăcămînt și are rezistivitatea $\rho_0=7$ ohm·m (citire pe curba laterală), iar rezistivitatea reală a stratului *1* este de 12 ohm·m (citire pe curba laterală) se poate calcula cu aproximație saturația S_w a stratului *1*:

$$S_w=\sqrt{\rho_0/\rho_r}=\sqrt{7/12}=76\%.$$

În acest fel s-a stabilit că și stratul *1* este un strat acvifer.

5.3. Varianta P-NL

Dimensiunile dispozitivelor uzuale sînt: $\overline{AM}=0{,}3$ m — curba potențială sau curba întîia; $\overline{AO}=2{,}15$ m — curba gradientă sau curba a treia.

În fig. III.17 este reprezentată o diagrafie electrică obișnuită înregistrată cu dispozitiv P—NL, într-o succesiune de strate argiloase și nisipoase. Stratul *1* este posibil să fie petrolifer, deoarece atît curba normală (potențială) cît și cea laterală (gradientă) au valori de peste 12 ohm.m. În același fel sînt reprezentate și stratele în care au pătruns fluidele aditive rezistive din noroiul de foraj, ca de exemplu motorina, sau dacă a pătruns filtrat cu rezistivitate mare.

Stratul *7* este saturat cu apă sărată, deoarece rezistivitatea măsurată pe curba laterală este mai redusă față de aceea măsurată pe curba normală.

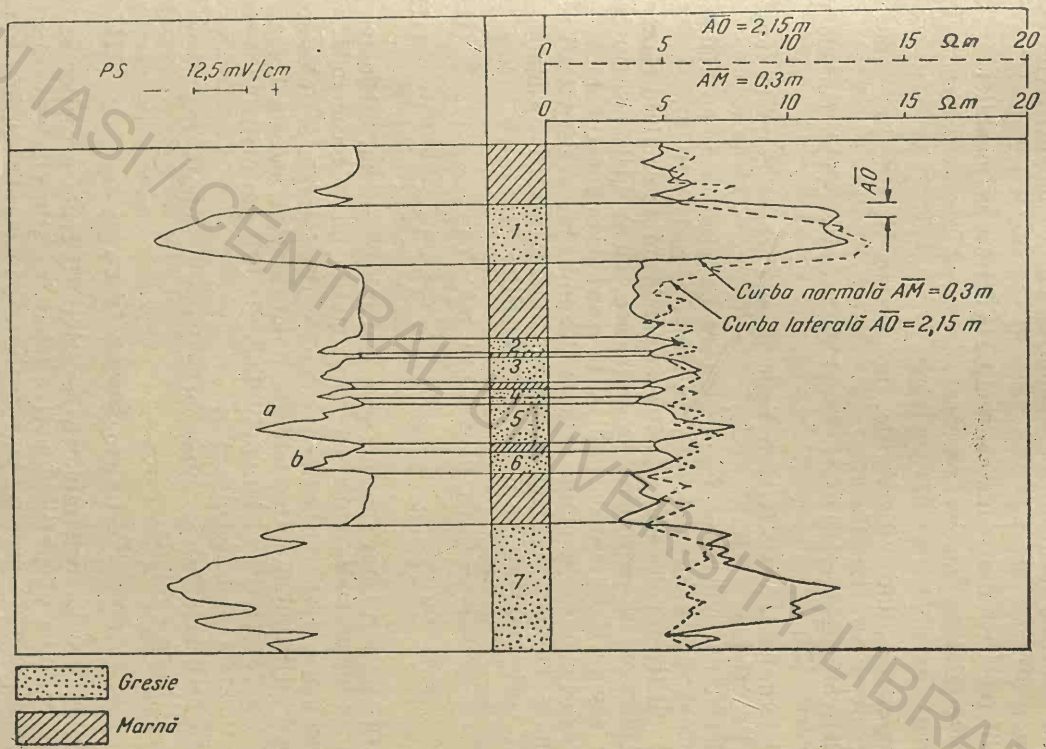


Fig. III.17. Succesiune de strate rezistive alternînd cu strate puțin rezistive. Înregistrare cu dispozitiv P-NL.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

6. DOMENIUL DE APLICABILITATE A DIAGRAFIILOR CLASICE DE REZISTIVITATE

Datele generale furnizate de diagrafiile clasice de rezistivitate sînt utilizate pentru:

— diferențierea dintre marne, roci tari și strate permeabile;

— determinarea zonelor poroase;

— definirea limitelor dintre strate;

— corelarea dintre diagrafiile înregistrate în diferite sonde pe baza reperelor stratigrafice (V. fig. II. 23);

— determinarea rezistivității zonei de invadare după curbele normale scurte [7];

— determinarea rezistivității reale după curbele normale lungi și a curbelor laterale [7];

— detectarea obiectelor metalice care au căzut sau au rămas la puț (acestea sînt evidențiate prin minime de rezistivitate).

Nu se utilizează în cazul găurilor de sondă forate cu fluid sărat sau pe bază de produse petroliere. De asemenea, nu se utilizează în cazul sondelor săpate fără fluid de foraj și în găuri de sondă tubate.

De menționat că în etapa actuală determinarea rezistivității reale după curbe normale se face sporadic; totuși pentru estimarea lui ρ_r după curbe normale se utilizează relațiile:

$$\rho_r \approx \rho_{1{,}6\text{ m (64 in)}} \text{ dacă } 10 \text{ m} > h > 5 \text{ m} \qquad \text{(III.8)}$$

$$\rho_r \approx 3/2\ \rho_{1{,}6\text{ m (64 in)}} \text{ dacă } 5 \text{ m} > h > 3 \text{ m}. \qquad \text{(III.9)}$$

Pentru strate a căror grosime este mai mică de 3 m, estimarea lui ρ_r după curbe normale, chiar cu aproximație, nu se recomandă.

Determinarea rezistivității reale după curbe laterale se folosește și în prezent utilizînd 6 curbe laterale (gradiente) și aceasta constituie metoda B.K.Z. (descrisă pe larg în bibliografie [3]) sau utilizînd 4 curbe laterale (metoda ing. Negoiță V.).

Pentru estimarea lui ρ_r după curba laterală avînd $\overline{AO}$=5,4 m (18 pic.) se utilizează relația:

$$\rho_r \approx \rho_{5{,}4\text{ m (18 pic.)}} \text{ dacă } h > 10 \text{ m}. \qquad \text{(III.10)}$$

În etapa actuală, determinarea rezistivității reale a rocilor se face cu precădere după diagrafii inductive (cînd investigările s-au făcut în găuri de sondă săpate cu noroi cu rezistivitate moderată sau foarte mare — noroi pe bază de produse petroliere —, sau în găuri de sondă fără noroi, săpate cu aer) și după diagrafii laterolog sau proximitilog (cînd investigările s-au făcut în găuri de sondă săpate cu noroi sărat).

7. DIAGRAFIA ELECTRICĂ LATERALĂ PENTRU ROCI CARBONATATE

Dispozitivele potențiale sau gradiente s-au dovedit a fi nepotrivite pentru delimitarea zonelor poroase din cuprinsul rocilor carbonatate din următoarele considerente:

— dispozitivele potențiale sau gradiente cu lungime mare au raze de investigare, în majoritatea cazurilor, mai mari decît grosimea intervalelor poroase;

— folosind un dispozitiv potențial cu lungime mică $\overline{AM}$=0,2 m (8 in) se detectează intervalele poroase subțiri în cazul găurilor de sondă cu diametru redus, dar nu este potrivit pentru găurile de sondă cu diametru mai mare;

— folosind un dispozitiv gradient cu lungime mică, deși este posibilă detectarea intervalelor poroase, curba înregistrată fiind foarte deformată geometric nu este concludentă.

Pentru refacerea simetriei curbei înregistrate cu dispozitiv gradient cu lungime mică, Schlumberger a realizat în anul 1945 un dispozitiv de investigare simetric, compus din două dispozitive gradiente. În U.R.S.S. se utilizează în acest scop două dispozitive potențiale.

7.1. Principiul metodei, dispozitivul și schema principială de măsură

Principiul măsurării rezistivității aparente a rocilor carbonatate (dure-compacte) se reduce în fond la utilizarea a două dispozitive gradiente, în scopul obținerii unor curbe mai clare și mai simple în acest gen de formațiuni.

Modul de asamblare a electrozilor și schema principială de măsură sînt redate în fig. III.18. Cele două dispozitive gradiente sînt conectate cap la cap (montaj în paralel), avînd comun electrodul de alimentare A.

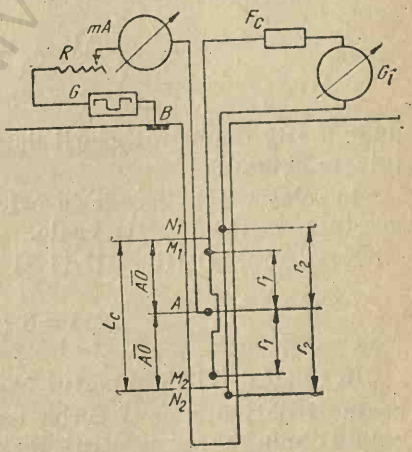


Fig. III.18. Dispozitivul și schema principială de măsură a rezistivității aparente în cazul rocilor carbonatate: A, B — electrozi de curent; M, M_1, N, N_1 — electrozi de măsură; G — generator de curent; R — reostat; mA — miliampermetru; F_c — filtru pentru curent continuu; G_i — galvanometru înregistrator; L_c — lungimea dispozitivului pentru calcare; $\overline{AO}$ — lungimea dispozitivului gradient.

7.2. Interpretarea calitativă

Să presupunem că dispozitivul se află în fața unei formațiuni dure, foarte groasă și atît de rezistivă încît curentul de investigare este obligat să circule numai prin noroiul de foraj din gaura de sondă, care are un diametru uniform. În aceste condiții se poate arăta că rezistivitatea aparentă înregistrată de dispozitivul de măsură pentru roci carbonatate este constantă atîta timp cît toți electrozii săi se află în dreptul formațiunii menționate ($\rho_r=\infty$). În plus, valoarea rezistivității aparente va depinde numai de mărimea diametrului găurii de sondă și de rezistivitatea noroiului:

$$\Delta V_{max}=\frac{\rho_{A\ max}}{4\pi}\frac{I}{}\left[\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right], \qquad \text{(III.11)}$$

în care: r_1 este distanța $\overline{AM_1}$ ($\overline{AM_2}$), iar r_2 — distanța $\overline{AN_1}$ ($\overline{AN_2}$).

O altă cale pentru determinarea diferenței de potențial maxime (ΔV_{max}) este de a determina valoarea rezistivității volumului de noroi cuprins între o pereche de electrozi M_1 și N_1 respectiv M_2 și N_2, folosind legea lui Ohm:

$$\Delta V_{max}=\frac{I}{2}\rho_n\frac{r_2-r_1}{\frac{\pi(d^2-d_d^2)}{4}}, \qquad \text{(III.12)}$$

unde d este diametrul găurii de sondă, iar d_d — diametrul dispozitivului (=85 mm).

În relația III.12 se ia în calcul numai 1/2 din I, dincau za divizării acestuia în două părți egale.

Egalizînd relațiile III.11 și III.12, rezultă:

$$\frac{\rho_{A_{max}}}{\rho_n}=8\,(r_1\cdot r_2)\,(d^2-d_d^2). \qquad \text{(III.13)}$$

În relația III.13 raportul $\rho_{A_{max}}/\rho_n$ reprezintă valoarea maximă ce poate fi obținută pe o curbă de rezistivitate aparentă înregistrată în dreptul unui strat a cărui rezistivitate este infinită. Produsul $r_1\cdot r_2$ din relația III.13 poate fi înlocuit cu pătratul distanței $\overline{AO}$:

$$\frac{\rho_{A_{max}}}{\rho_n}=8\,\overline{AO}^2\,(d^2-d_d^2). \qquad \text{(III.14)}$$

Conform relației III.14, amplitudinile anomaliilor de rezistivitate aparentă pe profilele înregistrate vor depinde de rezistivitatea noroiului de foraj, de pătratul diametrului găurii de sondă, de lungimea dispo-

zitivului și de rezistivitatea formațiunii; d_a este constant și în majoritatea cazurilor este 85 mm (diametrul dispozitivului).

Din relația III.14 se poate ușor deduce rezistivitatea aparentă (ρ_A) a rocilor carbonatate cînd se cunoaște diametrul găurii de sondă (d), lungimea dispozitivului ($\overline{AO}$) și rezistivitatea noroiului de foraj (ρ_n).

În fig. III.19 este prezentată forma unei curbe de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv pentru roci carbonatate. Imediat ce un electrod exterior N_1 sau N_2 este în apropierea limitei dintre stratul foarte rezistiv și cel conductiv, o parte din curentul de investigare se scurge în formațiune, reducînd diferența de potențial V dintre electrozii de măsură, astfel că amplitudinea curbei începe să scadă. Cînd dispozitivul de măsură se află la mijlocul intercalației conductive, cea mai mare parte din curentul de investigare se scurge în această direcție și rezistivitatea aparentă va avea valoarea minimă.

Grosimea intercalației conductive h apare pe curba ρ_A mai mare decît în realitate, cu o distanță egală cu lungimea dispozitivului L_c.

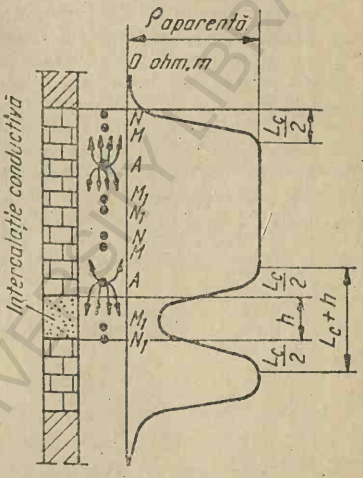


Fig. III.19. Curbă de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv pentru roci carbonatate

7.3. Domeniul de aplicabilitate

După cum s-a arătat, acest gen de investigare se folosește în cazul rocilor cu rezistivitate foarte mare, în special în cazul rocilor carbonatate, cu scopul de a evidenția zonele poroase subțiri din cuprinsul acestora.

Se poate afirma că metodele clasice de rezistivitate, care au fost utilizate exclusiv pînă în anul 1955, au adus importante servicii industriei de petrol, iar în prezent în formațiuni curate și condiții obișnuite de foraj continuă să ofere importante informații.

În prezent, după curbele normale și laterale se determină din ce în ce mai rar rezistivitatea reală, aceasta calculîndu-se după curbele înregistrate cu dispozitive inductive, laterolog și microdispozitive.

BIBLIOGRAFIE

1. Gheorghiu, C. **Manualul inginerului petrolist**, vol. 41, București, Editura tehnică, 1957, pp. 480—504.
2. Wyllie, M. R. I. **Bazele interpretării profilelor electrice ale sondelor**, București, Editura tehnică, 1959.
3. Dahnov, V. N. **Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă**, București, Editura tehnică, 1961.
4. **Realizări noi în diagrafia sondelor de țiței și gaze**, I.D.T., 1965.
5. Schlumberger. **Well Surveing Corp.** Documentațiile nr. 3, 4 și 7.
6. Pirson, Sylvain, J. **Handbook of Well Log Analysis**, Ed. 1963, pp. 82—132.
7. Guyod, H. Pranglin, I. A. **Analisis Charts for the Determination of the True Resistivity from Electric Logs.** Houston, Texas, 1959.
8. **Resistivity Well Log.** Interpretation Charts, Hauston Lane-Wells co. 1962.
9. Tixier, M. P. **Porosity index in limistone from electrical Logs.** The Oil and Gas Journal, Nov. 15 et Nov. 22, 1951.
10. Cahill, Jerry. **World Oil**, vol. 163, nr. 7 dec. 1966, pp. 98—110.
11. Schlumberger. **Log Interpretation Principles.** April. 1966.
12. Neguț. A. **Geofizica de sondă** (curs) București, Ed. didactică, 1966.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CAPITOLUL IV

MICROCAROTAJUL

Microcarotajul a fost introdus de Schlumberger în anul 1949 pentru a evidenția stratele subțiri și pentru măsurarea rezistivității acestora, astfel încît măsurătoarea să nu fie influențată de rezistivitatea stratelor adiacente. Ulterior s-a căutat să se determine factorul de rezistivitate a formațiunii prin măsurarea rezistivității aparente a zonei spălate.

1. PRINCIPIUL METODEI, DISPOZITIVUL ȘI SCHEMA PRINCIPIALĂ DE MĂSURĂ

Diagrafiile înregistrate cu dispozitive de microcarotaj fac parte din grupa metodelor care măsoară microvolume din formațiune; caracteristic pentru aceste metode este că măsurătoarea se face numai pe o porțiune din circumferința găurii de sondă (fig. IV.1).

Diagrafiile înregistrate cu dispozitive de microcarotaj se deosebesc de alte metode care măsoară microvolume prin aceea că volumul din formațiune investigat are formă aproximativă de semisferă, pe cînd în cazul microlaterologului forma volumului investigat este ca a unei trompete. Comun pentru această categorie de metode este aceea că toate dispozitivele de măsură trebuie presate pe peretele găurii de sondă.

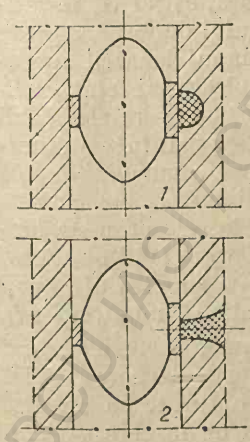


Fig. IV.1. Forma volumului din formațiune investigat cu microdispozitive:
1 — dispozitiv de microcarotaj; *2* — dispozitiv microlaterolog.

Microcarotajul constă în măsurarea simultană a rezistivității aparente a unui microvolum situat în jurul găurii de sondă cu ajutorul a două microdispozitive de lungimi diferite.

Aparatura de fund folosită la microcarotaj este constituită dintr-un dispozitiv în care cei trei electrozi plasați la distanță mică unul de

altul sînt fixați pe o patină izolantă, care este presată pe pereții găurii de sondă (fig. IV.2).

Prin electrodul A al microdispozitivului se trimite un curent de intensitate cunoscută și se înregistrează diferența de potențial creată de acest curent, pe de o parte între electrozii M_1 și M_2, și pe de altă parte între electrodul M_2 și un electrod de referință N situat la suprafață. Această rezistivitate este proporțională cu rezistivitatea mediului înconjurător (un microvolum) constituit din turta de noroi, o parte a stratului poros permeabil saturat cu filtrat de noroi (zona spălată) și o peliculă de noroi de foraj.

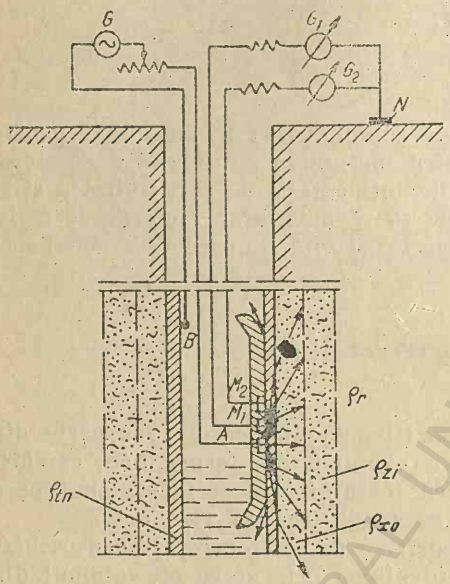


Fig. IV.2. Schema principială de măsură a rezistivității aparente utilizînd dispozitiv de microcarotaj:

A, B — electrozi de curent; M_1M_2 — electrozi de măsură; G — generator de curent; G_1, G — galvanometre înregistratoare.

Dispozitivele de măsură conțin două patine: pe una sînt montați electrozii de măsură M_1, M_2 și electrodul de curent A, iar cealaltă servește pentru presarea patinei cu electrozi pe peretele găurii sondei (astfel se elimină influența noroiului). Cei trei electrozi se conectează la conductorii cablului cu care se lansează aparatul în sondă.

Aparatele se introduc închise de la suprafață, astfel că rezistivitatea noroiului de foraj se poate măsura în timpul lansării aparatului, cînd electrozii sînt suficient depărtați de peretele găurii sondei. Cînd aparatul a ajuns în talpă, sistemul expandabil se deschide prin comandă de la zi. Cu acest gen de aparate se înregistrează, simultan cu curbele de microrezistivitate, și microcavernograma, care se înscrie pe pista diagramei rezervată obișnuit potențialului spontan (v. fig. IV.3). Microcavernograma dă o imagine amănunțită a variației diametrului găurii de sondă și precizia măsurătorii este de aproximativ 3 mm (1/8 in).

Unele aparate de microcarotaj sînt dotate cu o cameră pentru preluat probe de noroi, din care să se recolteze filtrat și turtă de noroi. Principiul este următorul: în aparat sînt două camere opturate cu un disc a cărui grosime este aleasă în funcție de adîncimea de la care s-a sta-

bilit a se prelua proba de noroi, respectiv filtrat și turtă de noroi. Aparatul lansat în gaura de sondă are astfel camerele opturate; la adîncimea stabilită, presiunea hidrostatică perforează discul și noroiul este admis în prima cameră pe o hîrtie de filtru, iar în camera a doua se recupe-

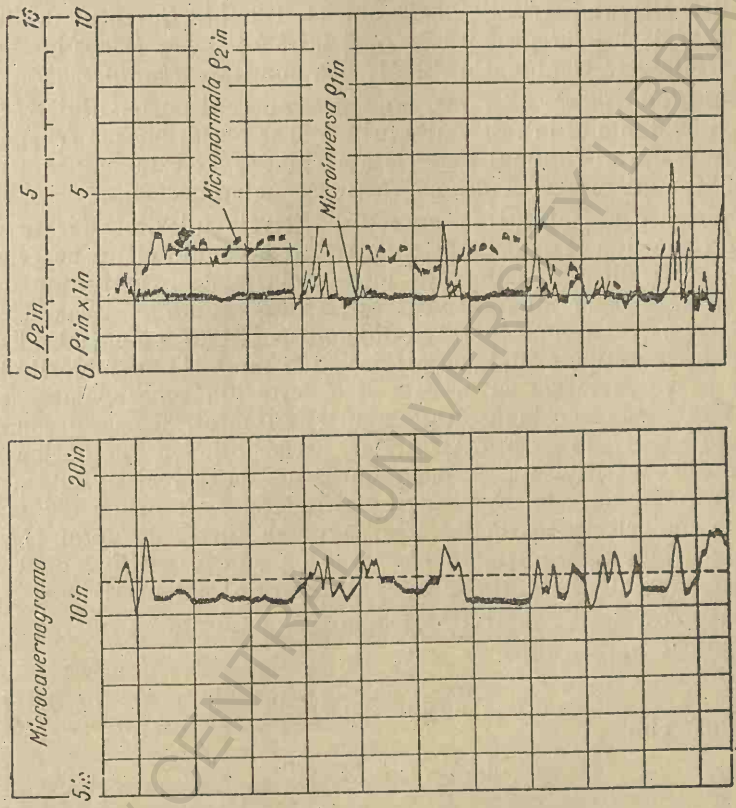


Fig. IV.3. Diagrafie înregistrată cu dispozitiv de microcarotaj.

rează filtratul și hîrtia de filtru cu turta. Măsurarea rezistivității filtratului și a turtei de noroi se face la înapoierea echipamentului la bază, în laborator.

În S.U.A., dispozitivele pentru microcarotaj au numiri diferite: microlog-Schlumberger; minilog-Lane-Wels; contact-log-Welex; microsurvey log-P.G.A.C.; micro-contact-log-Birdwell.

În U.R.S.S. sînt denumite dispozitive pentru microcarotaj ; în R.S. România: microcarotaj (prescurtat MC.).

Distanțele cele mai frecvent folosite între cei trei electrozi sînt de 25,4 mm (1 in). Aceste distanțe se folosesc și în R.S România

Curba înregistrată cînd se folosește combinația $A1''M_1 1''M_2$ este denumită *curba microinversă* sau *microgradientă* ($\rho 1'' \times 1''$) iar lungimea microdispozitivului $\overline{AO}$ este de 38 mm (1 1/2 in). Curentul de lucru se emite prin A și se înregisrează $\Delta V_{M_1M_2}$ între M_1 și M_2. Curba înregistrată cînd se folosește combinația $A2''M_2$ este numită *curba micronormală* sau *micropotențială ideală* $\rho 2''$, iar lungimea microdispozitivului $\overline{AM_2}$ este egală cu 50,8 mm (2 in). Se emite prin A și se recepționează $\Delta V_{M_2\infty}$ între M_2 și suprafață. Volumul materialului investigat este mai mic pentru combinația microinversă decît pentru cea micronormală.

Ca urmare a faptului că microdispozitivele folosite au raze de investigare diferite, și valorile de rezistivitate aparentă citite pe cele două curbe vor fi diferite. Diferența între valorile de rezistivitate înregistrate cu cele două microdispozitive a fost denumită „separație" sau „deplasare". Avînd în vedere că microdispozitivul potențial ideal are o rază de investigare mai mare (circa 100 mm) [1] în majoritatea cazurilor se va investiga cu aceasta și o parte din zona spălată, a cărei rezistivitate este mai mare decît a turtei de noroi, și, ca o consecință a acestui fapt, în dreptul stratelor permeabile se vor obține valori crescute de rezistivitate. A doua curbă de microrezistivitate (microinversa) avînd raza de investigare mai redusă decît prima (76 mm) va reda, în majoritatea cazurilor, rezistivitatea turtei de noroi [1].

Convențional, separația (deplasarea) s-a numit *pozitivă* cînd rezistivitatea aparentă măsurată cu microdispozitivul potențial ideal $\rho_{A(\overline{AM_2})}$ este mai mare decît rezistivitatea aparentă măsurată cu microdispozitivul gradient $\rho_{A(\overline{AO})}$ adică

$$\rho_{A(\overline{AM_2})} - \rho_{A(\overline{AO})} > 0 \qquad \text{(IV.1)}$$

și *negativă* cînd

$$\rho_{A(\overline{AM_2})} - \rho_{A(\overline{AO})} < 0. \qquad \text{(IV.2)}$$

2. INTERPRETAREA CALITATIVĂ

2.1. Strate permeabile și poroase

Rezistivitatea măsurată în fața unui strat poros și permeabil este o medie ponderată a rezistivității turtei de noroi (ρ_{tn}) și a zonei spălate (ρ_{xo}). Se deosebesc o serie de cazuri, după cum rezistivitatea zonei spălate este mai mare sau mai mică decît a turtei de noroi și după cum grosimea turtei de noroi este mai mare sau mai redusă.

Cazul stratelor poroase și permeabile acvifere cînd s-a săpat cu noroi pe bază de apă dulce. În cazul acesta rezistivitatea zonei spălate este mai mare decît a turtei de noroi, deoarece rezistivitatea filtrului care a pătruns în strat este mai mare decît rezistivitatea turtei de noroi, și

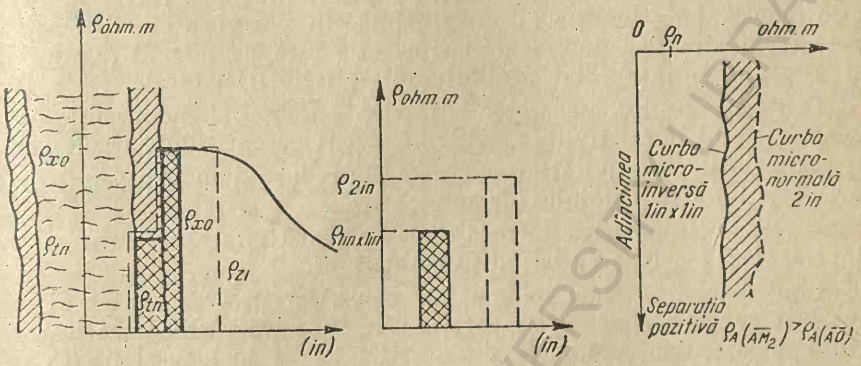


Fig. IV.4. Schema variației rezistivității în funcție de depărtarea înspre strat și volumele din formațiune care intră în măsurătoare utilizînd dispozitiv de microcarotaj; cazul stratelor poroase și permeabile saturate cu fluide cu rezistivitate ridicată în zona spălată și în zona invadată.

rezistivitatea globală măsurată cu dispozitivul microinvers 1″×1″ fiind mai mică decît rezistivitatea măsurată cu dispozitivul micronormal 2″. Asemenea strate poroase și permeabile vor fi evidențiate pe diagramă printr-o separație pozitivă (v. fig. IV.3). Ca o regulă stabilită empiric pe baza datelor observate, rezistivitățile aparente măsurate cu microdispozitive în dreptul unui strat permeabil și poros nu depășesc de 15 pînă la de 20 ori rezistivitate noroiului de foraj.

În fig. IV.4 se arată schematic cum variază rezistivitatea în funcție de depărtarea înspre strat. Chenarul desenat cu linie plină reprezintă rezistivitatea zonelor care intră în măsurătoare pentru dispozitivul microinvers 1″×1″, iar cel desenat cu linii punctate rezistivitatea zonelor care intră în măsurătoare pentru dispozitivul micronormal 2″.

Cazul stratelor poroase și permeabile petrolifere cînd s-a săpat cu noroi pe bază de apă dulce. Ca și în cazul precedent, rezistivitatea măsurată cu dispozitivul microinvers $\rho_{1''} \cdot \rho_{1''}$ este mai mică decît rezistivitatea măsurată cu dispozitivul micronormal $\rho_{2''}$ și asemenea strate sînt evidențiate pe diagramă tot printr-o separație pozitivă. Deosebirea față de primul caz este evidențiată pe diagrame prin faptul că valorile de

rezistivitate aparentă măsurate cu cele două microdispozitive în cazul stratelor petrolifere sînt mai mari decît în cazul stratelor acvifere, datorită prezenței hidrocarburilor reziduale din zona spălată.

Cazul stratelor poroase și permeabile acvifere cînd s-a săpat cu noroi sărat. În cazul noroaielor sărate, de obicei grosimea turtei de noroi este redusă, iar separația este neglijabilă. În asemenea situații, pentru detectarea stratelor poroase și permeabile este necesar să se studieze și alte curbe, în special profilul radioactivității naturale.

Criteriile pentru separarea stratelor poroase și permeabile după curbele de microrezistivitate sînt, în majoritatea cazurilor, următoarele:

— valorile rezistivităților aparente sînt reduse și nu depășesc 15—20 ori rezistivitatea noroiului de foraj;

— separație pozitivă între citirile de rezistivitate pe curba microinversă $1''\times1''$ și pe curba micronormală $2''$.

Cînd diametrul zonei spălate este redus, iar stratele poroase și permeabile conțin apă sărată, separația este negativă. Adîncimea invaziei fiind mică, în măsurătoarea de rezistivitate se include și partea din formațiune aflată dincolo de zona spălată. În asemenea condiții, turta de noroi este mai rezistivă decît formațiunea cu apă sărată și valoarea rezistivității aparente măsurată pe micronormala $2''$ va fi mai mică decît rezistivitatea aparentă măsurată pe microinversa $1''\times1''$ ($\rho_{1''\times1''}>\rho_{2''}$).

În fig. IV.5 se arată schematic cum variază rezistivitatea în funcție de depărtarea înspre stratul cu apă sărată a cărui zonă de invadare

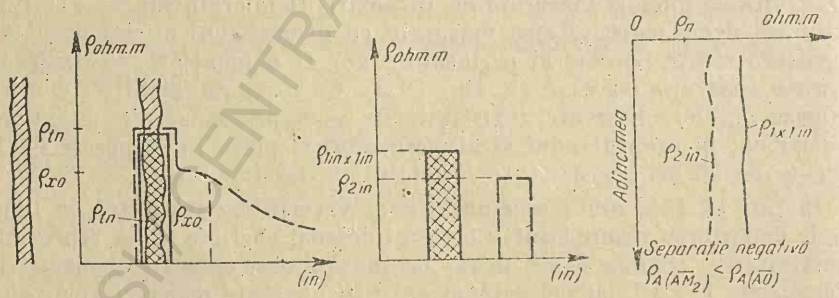


Fig. IV.5. Schema variației rezistivității în funcție de depărtarea înspre strat și volumele din formațiune care intră în măsurătoare utilizînd dispozitiv de microcarotaj; cazul stratelor poroase și permeabile saturate cu apă sărată.

este redusă. Chenarul desenat cu linie plină reprezintă rezistivitatea zonelor care intră în măsurătoare pentru dispozitivul microinvers $1''\times1''$, iar cel desenat cu linii punctate rezistivitatea zonelor care intră în măsurătoare pentru dispozitivul micronormal $2''$.

În cazul noroaielor din care se separă o cantitate redusă de filtrat, separația poate fi pozitivă sau negativă, după cum stratul permeabil și poros este saturat cu un fluid mai rezistiv sau mai puțin rezistiv.

În cazul formațiunilor cu porozitate și permeabilitate mare pe verticală, zona de invadare, respectiv zona spălată, este redusă, indiferent dacă s-a forat cu noroi din care se separă o cantitate mai mare sau mai mică de filtrat. În cazul rocilor de acest gen, separația poate fi pozitivă sau negativă, după cum stratul permeabil și poros este saturat cu un fluid mai rezistiv sau mai puțin rezistiv decît filtratul.

Pentru stratele permeabile și poroase se poate adăuga că efectul turtei de noroi are tendința să niveleze forma curbelor de microrezistivitate, în așa fel încît pe aceste curbe nu apar variații bruște în fața unui strat permeabil și poros, chiar atunci cînd factorul de rezistivitate se schimbă apreciabil în cuprinsul stratului.

2.2. Argile și marne

Cînd în dreptul argilelor sau marnelor nu sînt caverne, patina cu cei trei electrozi este separată de acestea printr-un film subțire de noroi (în dreptul marnelor nu se formează turtă de noroi). Valorile rezistivităților aparente, citite pe curbele de microrezistivitate, sînt apropiate de rezistivitatea marnelor sau argilelor. Separația este adesea negativă ca urmare a faptului că zona alterată are o rezistivitate mai mare decît zona nealterată (v. fig. IV.6).

Sînt și cazuri, mai rare, cînd în dreptul marnelor și argilelor separația este pozitivă, deși nu sînt caverne, ceea ce ar conduce la interpretarea că sîntem în dreptul unor strate permeabile și poroase. În asemenea situații este necesar să se folosească și alte curbe, ca de exemplu curba potențialului spontan, sau curba radioactivității naturale.

2.3. Formațiuni cu caverne

Foarte adesea, în dreptul argilelor și marnelor se întîlnesc intervale cu caverne, dar acestea pot apărea și în dreptul altor tipuri de formațiuni. De regulă, în dreptul cavernelor patina cu cei trei electrozi nu este etanșă pe peretele găurii de sondă. Se deosebesc două situații:

— caverna are un diametru mai mare decît diametrul maxim de deschidere a brațelor dispozitivului. În acest caz nu există separație și cele două curbe de microrezistivitate se suprapun; mărimea rezistivității măsurate este egală cu rezistivitatea noroiului de foraj (v. fig. IV.6);

— caverna are un diametru mai mic decît diametrul maxim de deschidere a brațelor dispozitivului. Măsurătoarea poate fi influențată de formațiune și cum de obicei noroiul are rezistivitate mai mică decît

formațiunile, se observă o separație pozitivă și din nou este posibilă o confunzie cu intercalațiile permeabile.

Echivocul poate fi eliminat prin analiza curbei *PS* sau a radioactivității naturale și în special a microcavernogramei. Tot în acest caz, separa-

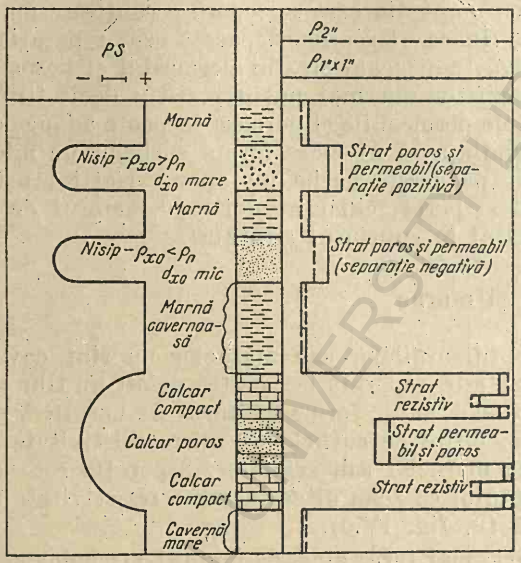


Fig. IV.6. Exemplificări de interpretare calitativă a diagrafiei de microcarotaj.

țiile pot alterna, fiind cînd pozitive cînd negative, după cum patina etanșează sau nu de peretele găurii de sondă cavernos. Spre deosebire de cazul rocilor dure (a se vedea fig. IV.6) unde de asemenea alternează separațiile pozitive și negative, în cazul marnelor și argilelor valoarea medie a rezistivității citită pe curbele de microrezistivitate este apropiată de rezistivitatea marnelor și de rezistivitatea noroiului (fig. IV.6)

2.4. Formațiuni compacte impermeabile

Ca și în cazul marnelor și argilelor, patina cu cei trei electrozi este separată de formațiune printr-un film subțire de noroi, a cărui grosime minimă se apreciază a fi de 1—1,5 mm. Filmul de noroi fiind foarte subțire și turta de noroi lipsind, rezistivitățile citite pe cele două curbe de microrezistivitate vor fi mari și apropiate de rezistivitatea reală a rocii. Ca o regulă, stabilită empiric pe baza datelor observate, rezistivitățile

sînt mai mari de 20 ori decît rezistivitatea noroiului de foraj. În funcție de distanța patinei în raport cu neregularitățile peretelui, calea oferită curentului spre scăpare înspre coloana de noroi poate fi mai mare sau mai mică. Ca urmare, curbele indică numeroase vîrfuri și depresiuni pronunțate și separațiile pozitive și negative alternează (v. fig. IV.6).

2.5. Factori care denaturează formele curbelor de microcarotaj

— Funcționarea corectă a dispozitivului de microcarotaj depinde de contactul mecanic și electric al patinei izolante cu cei trei electrozi de peretele găurii de sondă. Un contact imperfect poate fi cauzat de: spargerea patinei; umflarea incompletă a patinei hidraulice; acumularea de turtă între peretele sondei și patină, ceea ce conduce la depărtarea acesteia de perete.

— Contactele electrice imperfecte sau bimetalismul de asemenea denaturează curbele înregistrate.

Cînd patina cu electrozi este etanșă pe peretele găurii sondei, rezistivitatea noroiului de foraj și densitatea acestuia nu are nici un efect asupra aspectului curbelor de microcarotaj.

3. INTERPRETAREA CANTITATIVĂ

Prin interpretarea cantitativă în cazul diagrafiei de microcarotaj se înțelege determinarea în prima etapă a rezistivității zonei spălate (ρ_{xo}), în vederea determinării în a doua etapă a factorului de rezistivitate al formațiunii F din relația

$$\rho_{xo}=F\cdot\rho_f \qquad \text{(IV.3)}$$

și a porozității din relațiile

$$F=\rho_{xo}/\rho_f=1/\varphi^2 \qquad \text{(IV.4)}$$

3.1. Determinarea rezistivității zonei spălate

Pe baza măsurătorilor de laborator s-au întocmit abace cu ajutorul cărora se determină rezistivitatea zonei spălate în roci poroase și permeabile, utilizînd citirile rezistivităților aparente pe curba micronormală 2″ și microinversă 1″×1″.

Pentru determinarea lui ρ_{xo} de pe abace este necesar să se cunoască rezistivitatea turtei de noroi, deoarece actualele abace simplificate sînt calculate pentru rapoartele:

$$\rho_{1''\times1''}/\rho_{tn} \text{ și } \rho_{2''}/\rho_{tn}$$

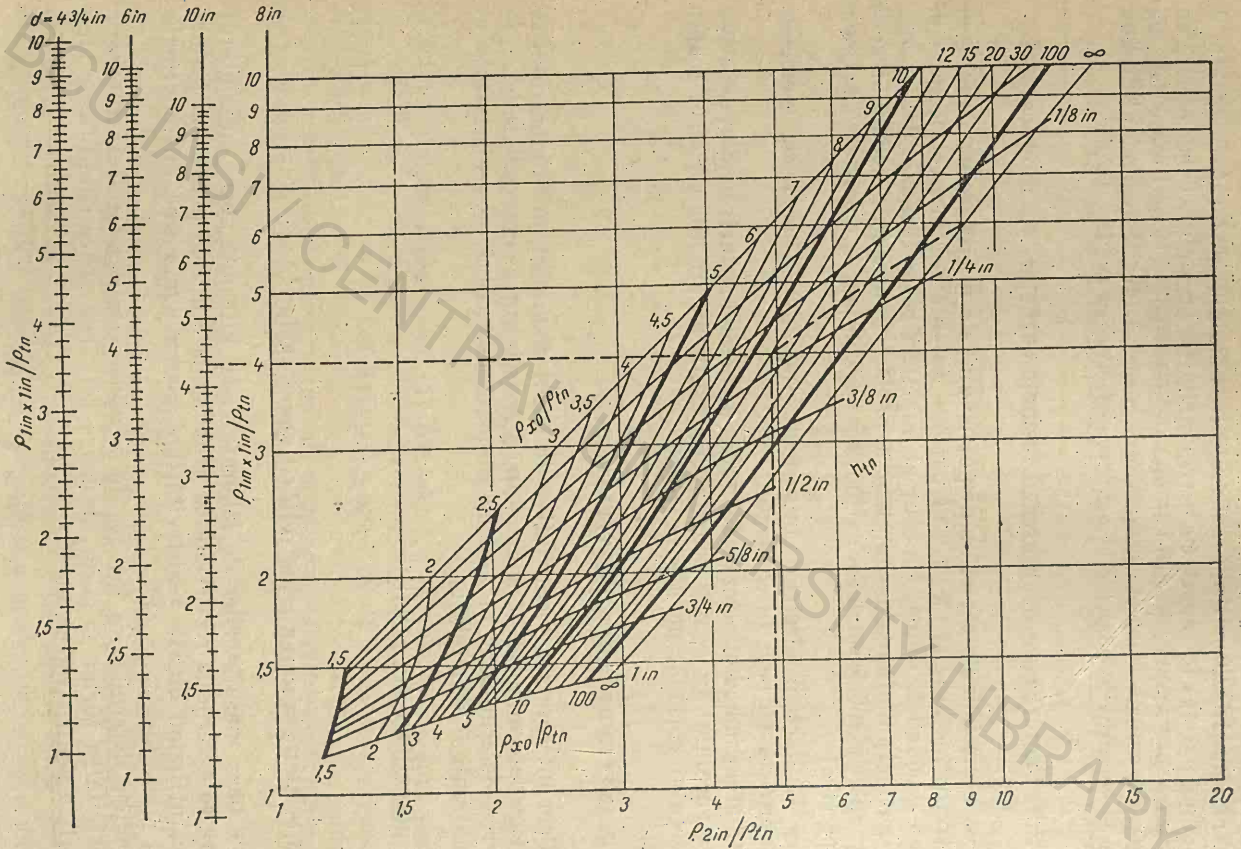


Fig. IV.7. Abacă pentru determinarea rezistivității zonei spălate (ρ_{xo}) după diagrafii de microcarotaj [2].

Dacă se cunoaște rezistivitatea noroiului de foraj după determinările din laborator, se calculează rezistivitatea acestuia la temperatura din dreptul intervalelor ce interesează utilizînd abaca din fig. I.2.

Deoarece măsurarea microrezistivității aparente este influențată de diametrul găurii de sondă, sînt necesare corecții; astfel de corecții se fac cu ajutorul abacei din fig. IV.7.

Abacele pentru determinarea lui ρ_{xo} se construiesc în funcție de tipul aparatului utilizat, respectiv de tipul patinei (hidraulică, masivă etc.). Abaca din fig. IV.7 este construită pentru un dispozitiv cu patină hidraulică avînd $K_{2'}/K_{1'\times1'}=1{,}3$.

Cu abacele de tipul celei prezentate în fig. IV.7 se determină raportul ρ_{xo}/ρ_{tn} și grosimea turtei de noroi h_{tn}.

Datele necesare pentru determinarea rezistivității zonei spălate sînt $\rho_{1'\times1'}$ — citită după curba microinversă; $\rho_{2'}$ — citită după curba microcronormală; d — diametrul găurii de sondă determinat pe microcavernogramă; ρ_{tn} — determinată la temperatura stratului cercetat; h_{tn} — determinată după datele microcavernogramei.

Utilizarea abacei din fig. IV.7. Se calculează rapoartele: $\rho_{1''\times1''}/\rho_{tn}$ și $\rho_{2''}/\rho_{tn}$. Raportul $\rho_{1''\times1''}/\rho_{tn}$ se înscrie pe scala verticală corespunzătoare diametrului găurii de sondă d, din care se duce orizontala pînă ce intersectează verticala ridicată din punctul de pe abscisă corespunzătoare valorii $\rho_{2''}/\rho_{tn}$. Punctul astfel obținut determină valoarea lui ρ_{xo} și a grosimii teoretice a turtei de noroi. Dacă între grosimea teoretică a turtei de noroi găsită pe abacă și grosimea reală determinată pe microcavernogramă sînt diferențe mari (de la simplu la dublu), datele obținute pentru ρ_{xo} trebuie folosite doar cu mare prudență.

O cauză a neconcordanței dintre grosimea teoretică a turtei de noroi și grosimea reală a acesteia este introducerea în calcule a unei valori necorespunzătoare a rezistivității turtei noroiului. În acest caz se determină cu aproximație valoarea rezistivității zonei spălate și a rezistivității turtei de noroi, cu condiția să se cunoască exact grosimea turtei de noroi. În acest scop, pe abacă se trasează curba corespunzătoare valorii grosimii reale a turtei de noroi. Se marchează pe abacă punctul de coordonate $\rho_{2''}/\rho_{tn}$ și $\rho_{1''\times1''}/\rho_{tn}$.

$\rho_{1''\times1''}/\rho_{tn}$ se înscrie pe una din scalele verticale, corespunzător diametrului din dreptul stratului studiat, și se trasează orizontala pînă intersectează verticala ridicată prin punctul de pe abscisă corespunzătoare valorii $\rho_{2''}/\rho_{tn}$. Din punctul obținut, ca mai sus, se trasează pe abacă o linie dreaptă care face un unghi de 45° cu abscisa. Intersecția dintre cele

două drepte trasate pe abacă reprezintă valorile aproximative ale rapoartelor $\rho'_{1''\times 1''}/\rho'_{tn}$, $\rho'_{2''}/\rho'_{tn}$ și ρ_{x0}/ρ_{tn}. ρ'_{x0} se calculează cu relația:

$$\rho'_{x0} = \frac{\rho'_{x0}}{\rho'_{2''}} \cdot \rho_{2''}$$

Rezistivitatea zonei spălate după abace poate fi determinată cu valori exacte pentru grosimi ale turtei mai mici de 9,5 mm (3/8 in).

Exemplu: $d=10$ in; $\rho_{1''\times 1''}=4{,}3$ ohm·m; $\rho_{2''}=4{,}9$ ohm·m și $\rho_{tn}=1$ ohm·m. Soluția: $\rho_{x0}/\rho_{tn}=12$; $\rho_{x0}=12$ ohm·m; $h_{tn}=3/16$ in.

3.2. Determinarea factorului de rezistivitate a formațiunii F și a porozității $\varnothing$

În acest scop se folosește abaca din fig. IV.8, fiind necesare următoarele date: ρ_{tn} — rezistivitatea turtei de noroi; ρ_{x0} — rezistivitatea zonei spălate; ρ_f — rezistivitatea filtratului; S_{Hr} — saturația în hidrocarburi reziduale; m — exponentul porozității.

Saturația în hidrocarburi reziduale se determină după date statistice, sau după date orientative care sînt redate în tabelul 2. Exponentul porozității se determină în laborator, după date statistice, sau cum se procedează în mod obișnuit se consideră $m=2$. ρ_{tn} și ρ_f se calculează cu abacele I.1 și I.2.

Saturația în hidrocarburi reziduale (S_{Hr}) este necesar să fie cunoscută, deoarece factorul de rezistivitate a formațiunii, calculat conform relației IV.4, este un factor aparent

$$F_A = \rho_{xo}/\rho_f \qquad \text{(IV.6)}$$

care diferă de F, datorită prezenței hidrocarburilor reziduale.

$$\text{Cînd } S_{Hr}=0, \text{ atunci și } F_A=F \qquad \text{(IV.7)}$$

Utilizarea abacei din fig. IV.8. Se transcriu valorile lui ρ_{x0}/ρ_{tn} și ρ_{tn} pe scalele corespunzătoare, iar prin punctele respective se duce o linie dreaptă pînă intersectează scala gradată ρ_{x0}. S-a determinat astfel rezistivitatea zonei spălate. Din punctul ρ_{x0} se duce o linie dreaptă prin punctul ρ_f de pe scala corespunzătoare și se prelungește pînă la scala ρ_{x0}/ρ_f. S-a determinat astfel factorul aparent de rezistivitate a formațiunii F_A. Se trasează o linie prin F_A și S_{Hr} și se citește F și φ cînd $F=\frac{0{,}62}{\varphi\, 2{,}15}$

Pentru a determina pe $\varnothing$ cînd $F=\varnothing^{-m}$ se trasează o linie prin F și prin m și se citește pe scala $\varnothing^{-m}$ porozitatea căutată.

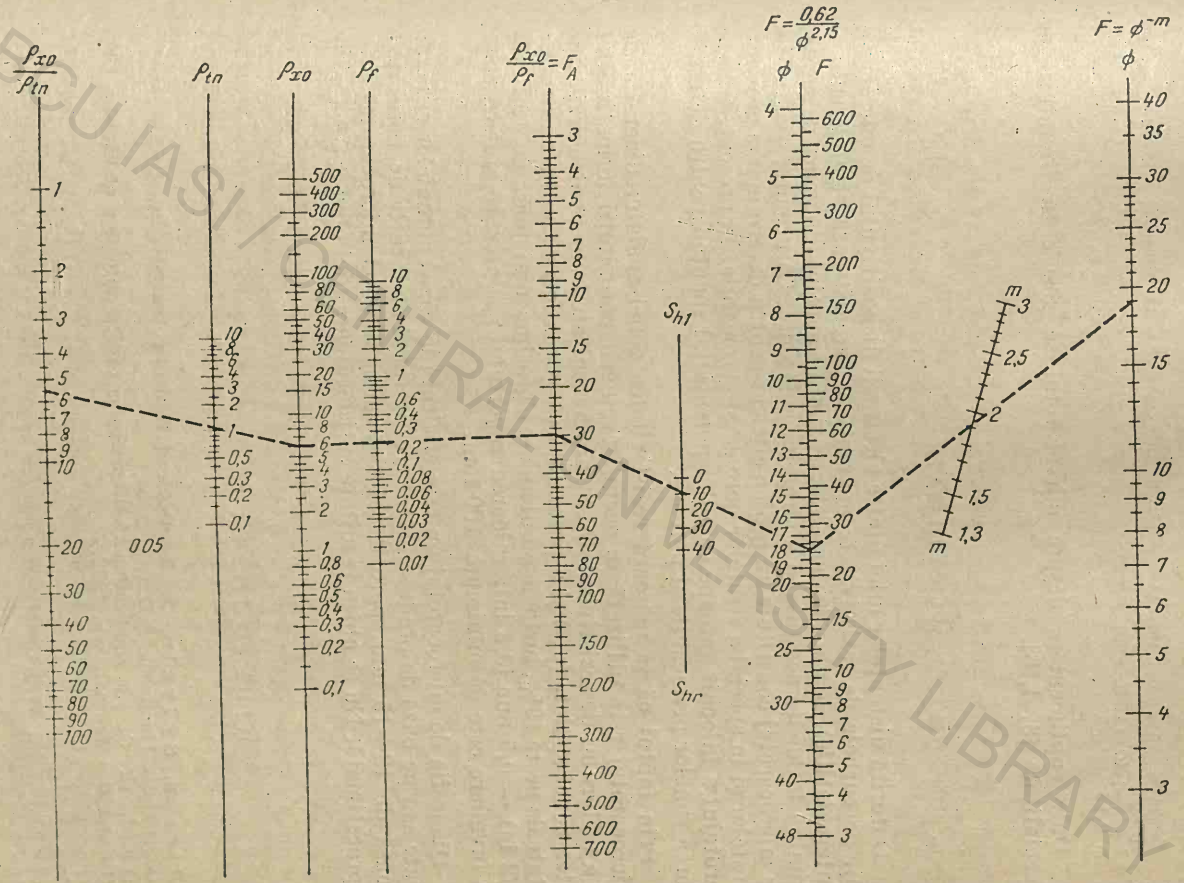


Fig. IV.8. Abacă pentru determinarea factorului de rezistivitate (F) şi a porozităţii (Φ) după valorile rezistivităţii zonei spălate ρ_{xo} [2.]

ECU IAŞI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Exemplu. $\rho_{xo}/\rho_{tn}=5{,}5$; $\rho_{tn}=1{,}1$ ohm·m; $\rho_f=0{,}2$ ohm·m; $S_{Hr}=10\%$; $m=1{,}9$.

Soluția: $\rho_{xo}=6$ ohm·m; $F_A=30$ ohm·m; $F=24$ ohm·m; $\varnothing=18\%$ cînd $F=\frac{0{,}62}{\varphi\ 2{,}15}$; $\varnothing=19\%$ cînd $F=\varnothing^{-2}$.

Date suplimentare despre microcarotaj se găsesc în literatura de specialitate [3, 4, 5].

4. DOMENIUL DE APLICABILITATE

Datorită distanțelor mici dintre electrozii dispozitivului de microcarotaj, pe curbele de rezistivitate aparentă se înregistrează stratele subțiri (intercalațiile). În plus, izolarea electrozilor de noroiul din gaura de sondă, elimină influența acestuia și a stratelor adiacente. Ca urmare, diagrafiile de microcarotaj constituie un mijloc eficient pentru determinarea grosimii stratelor și în special a stratelor poroase și permeabile. În prezent, microcarotajul a înlocuit aproape complet potențialul spontan pentru determinarea zonelor permeabile și poroase.

Prin faptul că se măsoară rezistivitatea zonei spălate, diagrafia de microcarotaj este utilizată în scopul evaluării porozității formațiunilor și a factorului de rezistivitate F. Se obțin rezultate bune pentru rezistivitatea zonei spălate (ρ_{xo}) și a porozității ($\varnothing$) dacă formațiunile au o porozitate de peste 15%, turta de noroi nu are o grosime mai mare de 12,7 mm (1/2 in) — 9,5 mm (3/8 in), valoarea raportului $\rho_{xo}/\rho_{tn}<15$ și dacă zona de invadare este de minimum 100 mm.

Diagrafia de microcarotaj nu este eficientă în cazul noroaielor mineralizate sau pe bază de produse petroliere. În cazul unei turte de noroi mai groasă de 12—15 mm, porozitatea determinată după microcarotaj este supraestimată. Nu se obțin rezultate satisfăcătoare nici cînd $\rho_{xo}/\rho_{tn}>25$.

BIBLIOGRAFIE

1. Pirson, Sylvain, J. **Handbook of Well Log Analysis**, Ed. 1963.
2. Loganalysis Handbook P.G.A.C., 1966.
3. Doll, H. G. ș.a. **Application of Micrologging to Determination of Porosity The Oil and Gas Journal**, sep. 1952.
4. Goyod, H. **Principles of Microlog Interpretation.** The Oil and Gas Journal. Dec. 1951.
5. Martin, M. **With the Microlog you can be sure.** The Oil and Gas Journal, Sept. 1955.

CAPITOLUL V

DIAGRAFII LATEROLOG

Distribuţia liniilor de forţă ale cîmpurilor electrice create de dispozitivele folosite în diagrafiile clasice de rezistivitate se face preferenţial. Distribuţia preferenţială urmează legea generală de concentrare a liniilor de forţă în mediile cu rezistivităţi mici (medii conducătoare, cum este cazul argilelor, marnelor şi în special a noroaielor sărate).

Ca urmare a distribuţiei preferenţiale a liniilor de forţă ale cîmpului electric, precum şi a refracţiei acestora, diagrafiile clasice de rezistivitate (v. cap.III) au o serie de deficienţe dintre care:

— în cazul stratelor subţiri, rezistivităţile citite pe diverse curbe sînt mult diferite de rezistivitatea reală;

— imposibilitatea executării diagrafiilor clasice de rezistivitate în noroaie sărate.

Pentru eliminarea dificienţelor diagrafiilor clasice de rezistivitate, în anul 1927 Conrad Schlumberger a conceput un dispozitiv laterolog-3 (electrodă de gardă) care focaliza curentul de măsură. Acest gen de investigare a fost temporar abandonat, însă a fost reluat în anul 1949 de către Birdwell, iar mai tîrziu de Schlumberger sub denumirea de laterolog-3.

Investigarea cu dispozitive laterolog constă în a crea un fascicul de curent de intensitate constantă şi de o grosime calibrată, dirijat perpendicular pe peretele găurii de sondă. Efectul rezistivităţii noroiului este neglijabil cînd raportul dintre rezistivitatea stratului şi a noroiului este suficient de mare (cazul noroaielor mineralizate). Efectele formaţiunilor adiacente sînt practic eliminate în cazul stratelor a căror grosime este mai mare decît a fasciculului (spaţial) de curent focalizat. Efectul zonei invadate este minim cînd rezistivitatea acesteia este mai mică decît rezistivitatea reală a stratului investigat şi diametrul acestei zone este relativ redus. În cazul particular, cînd lipseşte zona de invadare, rezistivităţile măsurate sînt foarte aproape de rezistivităţile reale [1].

1. LATEROLOG-3

1.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură

Principiul metodei laterolog-3 este schiţat în fig. V.1. Utilizînd un electrod cilindric lung ca electrod de emisie de curent, liniile cîmpului

electric se vor propaga în mediul înconjurător, după cum este indicat în fig. V.1 *a*. Important este că liniile cîmpului electric sînt radiale şi paralele în partea centrală a acestuia şi dirijate spre exterior în părţile periferice. Plecînd de la această observaţie se poate împărţi electroda în

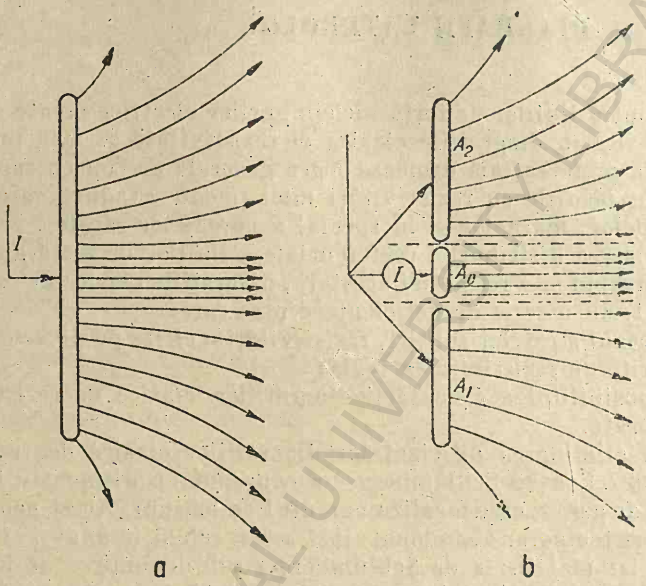


Fig. V.1. Forma schematică a cîmpului electric LL3.

trei; dacă se menţin cele trei părţi la acelaşi potenţial, măsurîndu-se curentul emis de către partea centrală, se obţine dispozitivul laterolog-3 (fig. V.1 *b*).

În consecinţă, investigarea cu laterolog-3 constă în a trimite un curent alternativ calibrat de intensitate I_0 între electrozii de curent A_0 şi B_0 şi aplicarea unui curent variabil I_1 (baraj) electrozilor A_1 şi A_2, pentru ca să se asigure o valoare a diferenţei de potenţial egală cu zero între electrozii A_1, A_2 şi A_0 (v. fig. V.2),

$$U_1 = U_{A_0} - U_{A_1} = 0 \qquad (V.1)$$

$$U_2 = U_{A_0} - U_{A_2} = 0 \qquad (V.2)$$

De menţionat că polaritatea curentului I_1 este de acelaşi semn cu al curentului de alimentare I_0. În această situaţie, între electrozii A_1 şi A_0 şi între electrozii A_2 şi A_0 există cîte un punct O_1, respectiv O_2, în

care componenta verticală Z a cîmpului electric rezultat față de electrodul A_0 considerat ca origine este zero (fig. V.2). Ca urmare, în punctele imaginare O_1 și O_2 diferența de potențial va fi zero și nu va circula nici un curent, iar cîmpul electric creat de electrodul A_0 nu se va dispersa pe verticală, ci va fi dirijat perpendicular pe peretele găurii sondei (v. fig. V.1) [4].

Planele imaginare care trec prin O_1 și O_2 joacă rol determinant în desfășurarea măsurătorii, întrucît deplasarea acestor plane spre unul din electrozii de focalizare A_1 sau A_2 și respectiv către A_0 face ca în punctele imaginare O_1 și O_2 diferența de potențial să fie diferită de zero. Pentru a se evita o asemenea situație prin intermediul elementului de compensare *1* (v. fig. V.2) se reglează curentul care alimentează electrozii A_1 și A_2, restabilind echilibrul impus de condiția de măsurare conform relațiilor V.1 și 2. În cazul noroaielor mineralizate, ρ_{tn}, ρ_{xo} și ρ_{zi} au valori reduse față de rezistivitatea zonei necontaminate (ρ_r). Considerînd zonele enumerate mai sus ca niște rezistențe montate în serie, rezultă că valoarea rezistenței măsurate R_A este foarte apropiată de rezistența zonei necontaminate R_r, deoarece:

$$R_A = R_n + R_{tn} + R_{xo} : R_{zi} + R_r, \quad \text{(V.3)}$$

Cum

$$R_n \approx R_{tn} \approx R_{xo} \approx R_{zi} \approx 0, \quad \text{(V.4)}$$

rezultă că

$$R_A \approx R_r, \quad \text{(V.5)}$$

deci

$$\rho_A \approx \rho_r. \quad \text{(V.6)}$$

Diagrafia care se înregistrează rezultă din diferența de potențial (ΔU) măsurată între electrozii A_0 și N (v. fig. V.2):

$$\Delta U = U_{A_0} - U_N. \quad \text{(V.7)}$$

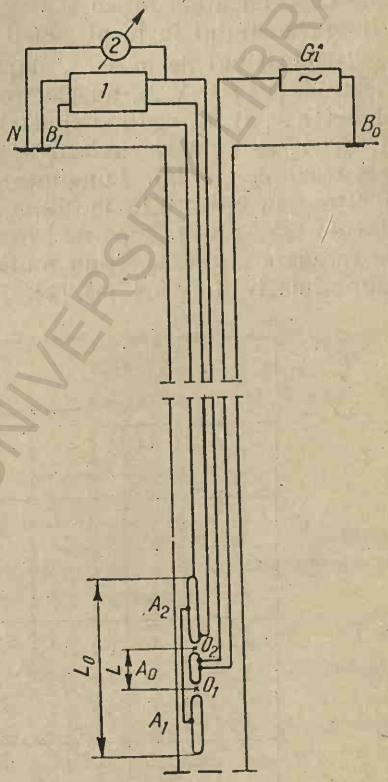


Fig. V.2. Schema principială de măsură a rezistivității aparente utilizînd dispozitiv laterolog-3:

A_0 — electrod de curent; A_1, A_2 — electrozi de ecranare; L — lungimea dispozitivului; L_0 — lungimea totală a dispozitivului; O_1O_2 — puncte imaginare în care $\Delta V = 0$; N — electrod de măsură; B_1 — electrod de curent (baraj); B_0 — electrod de curent (alimentare); *1* — element de compensare; *2* — galvanometru înregistrator; G — generator de curent.

Ca rezultat al investigării se obține rezistivitatea aparentă determinată după formula generală

$$\rho_A = K\frac{\Delta U}{I_0} \qquad (V.8)$$

unde K este constanta dispozitivului, care se determină (obișnuit) pe cale experimentală într-o sondă de încercare la care se cunoaște rezistivitatea mediului în jurul găurii [1].

Dispozitivul de măsură, după cum s-a arătat, se compune din trei electrozi (v. fig. V.2), un electrod central (principal) A_0 și doi electrozi alungiți A_1 și A_2, egali și simetric dispuși față de A_0. Electrozii alungiți A_1 și A_2 se numesc *electrozi de ecranare* și sînt scurtcircuitați între ei (electrozi de gardă). Lungimea electrodului central poate fi 0,60 m, 0,30 m sau chiar 0,15 m. Lungimile electrozilor de ecranare A_1 și A_2 sînt de 1,5—1,8 m. Zona de investigare depinde de lungimea electrozilor de ecranare A_1 și A_2, fiind multiplu de trei cu lungimea unui electrod (aproximativ 4,5—5,4 m) [1].

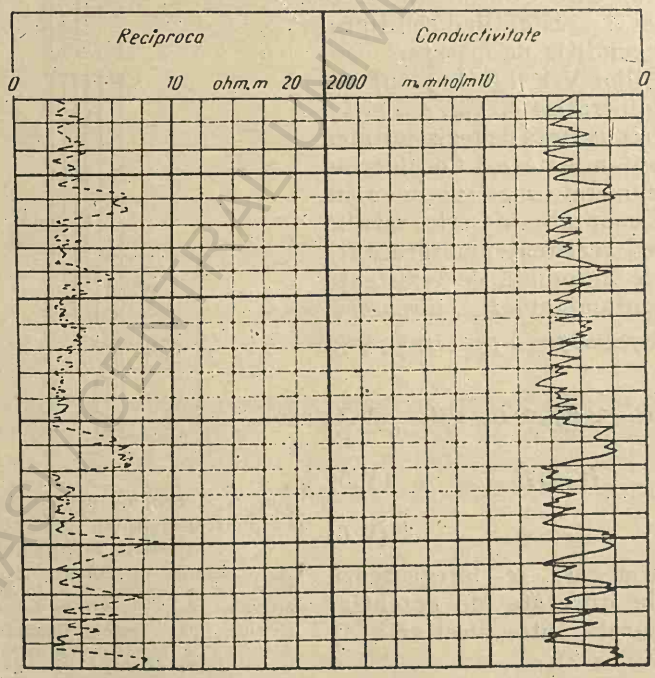


Fig. V.3. Diagrafie înregistrată cu dispozitiv laterolog-3.

Caracteristicile dispozitivului. Lungimea L a dispozitivului este egală cu distanța dintre punctele medii O_1, O_2, plasate la jumătatea distanței dintre electrozii A_0-A_1 și A_0-A_2. Distanța O_1O_2 coincide practic cu lățimea fasciculului de curent focalizat.

Lungimea totală a dispozitivului $L_0=\overline{A_1A_2}$. De această lungime depinde zona investigată (raza de investigare). Cu cît $\overline{A_1A_2}$ este mai mare, cu atît adîncimea investigată este mai mare.

Modulul de extindere este definit de raportul

$$q=\overline{A_1A_0}/\overline{O_1A_0}=L_0/L \qquad (V.9)$$

numit și *modul de focalizare*.

Punctul de înregistrare a rezistivității aparente se raportează la nivelul electrodului central A_0 al dispozitivului.

Dispozitivele laterolog-3 sînt numite diferit și anume: în S.U.A. după societatea constructoare: Laterolog-3 (LL3)-Schlumberger; Current Focused Logs-Lane-Wells; Guard Log-Wellex; Laterolog-LL3 — P.G.A.C.; Guard Log-Birdwell; în U.R.S.S: bokovîi carotaj; în România: laterolog-3 (prescurtat LL3).

În fig. V.3 este prezentată o diagrafie înregistrată cu dispozitiv laterolog-3. Deoarece pe diagrafiile laterolog-3 se măsoară în multe cazuri direct rezistivitatea reală, se obișnuiește a se prezenta atît curba de conductivitate cît și reciproca ei.

1.2. Interpretarea calitativă

Prin măsurătorile cu dispozitivul laterolog-3 se obține o valoare a rezistivității ρ_g, care rezultă din însumarea a o serie de factori geometrici înmulțiți cu rezistivitățile specifice zonelor respective:

$$\rho_g=G_n\rho_n+G_{zi}\rho_{zi}+G_r\rho_r \qquad (V.10)$$

în care G_n, G_{zi} și G_r sînt factorii geometrici ai dispozitivului laterolog-3, pentru noroi, zona invadată și respectiv zona necontaminată.

Au fost omiși factorii pentru spațiul inelar și pentru turta de noroi, deoarece experiențele au arătat că acești factori sînt neglijabili.

Suma factorilor geometrici satisface relația:

$$\Sigma G=1 \qquad (V.11)$$

Factorii geometrici enumerați mai sus depind de dimensiunile instrumentului, precum și de diametrul găurii de sondă și diametrul zonei invadate.

Relația 10 se obține din expresia generală:

$$\rho_g=\int_{r_e}^{\infty}\rho\,\frac{dr}{A} \qquad (V.12)$$

în care r_e este raza instrumentului; r — distanța de la centrul dispozitivului la punctul considerat; A — secțiunea transversală a fasciculului liniilor de curent pe direcția razei r.

În fig. V.4 este prezentat un strat rezistiv subțire, situat între două strate groase conductive, avînd aceeași rezistivitate ca a noroiului de foraj. Este evident că fasciculul E are tendința să evite mediul rezistiv, cauzînd astfel răspîndirea și pătrunderea liniilor de curent în formațiunea conductivă. Conform relației V.12 rezultă că împrăștierea va conduce la reducerea rezistivității măsurate în două cazuri:

— secțiunea transversală A a fasciculului liniilor de curent crește;

— parte din liniile de curent ale fasciculului pătrund în mediul conductiv.

În fig. V.5 este arătat cazul unui strat rezistiv gros, avînd rezistivitatea mai mare decît a noroiului de foraj, $\rho_r > \rho_n$, străbătut de o gaură de sondă cu diametru mare. Ca și în cazul precedent, fasciculul E are

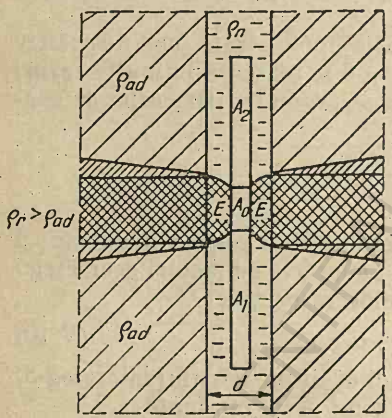


Fig. V.4. Exemplu de împrăștiere a liniilor de curent ale fasciculului E, în cazul unui strat rezistiv subțire situat între două strate conductive groase; $\rho_{ad} = \rho_n$.

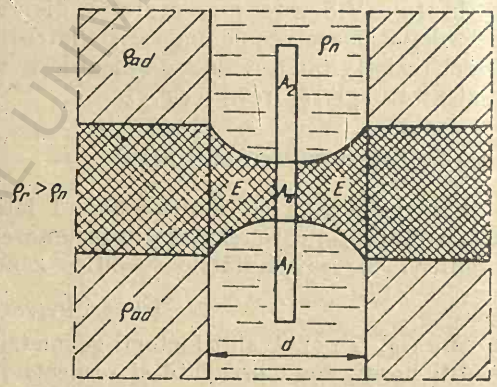


Fig. V.5. Exemplu de împrăștiere a liniilor de curent ale fasciculului E, în cazul unui strat rezistiv gros străbătut de o gaură de sondă cu diametru mare; $\rho_r > \rho_n$ [2].

tendința să evite mediul rezistiv și deoarece gaura de sondă are un diametru mare, liniile de curent ale fasciculului se vor răspîndi în noroiul; de foraj, care este mai puțin rezistiv. Această împrăștiere duce la creșterea secțiunii transversale A a fasciculului liniilor de curent, ceea ce, conform relației 12, va reduce rezistivitatea aparentă măsurată ρ_a.

În fig. V.6 este reprezentat un strat conductiv subțire cuprins între două strate groase rezistive. Lungimea L a fasciculului de curent E este mai mare decît grosimea stratului h. În schema din partea stîngă a fig. V.6, electrodul de curent A_0 se află în dreptul stratului. În această

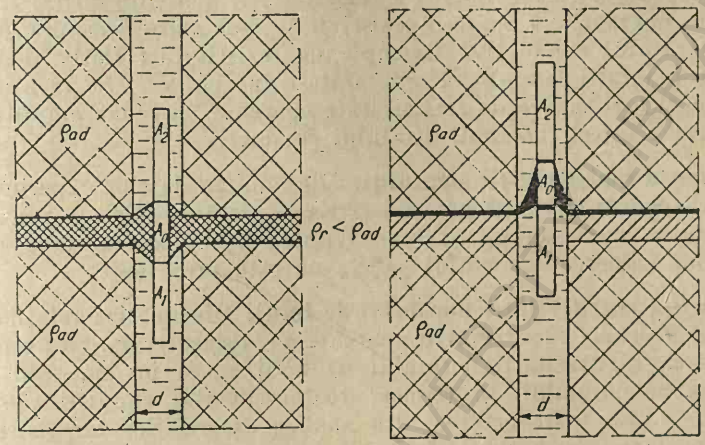


Fig. V.6. Exemplu de concentrare a liniilor de curent ale fasciculului E în cazul unui strat conductiv subțire situat între două strate rezistive groase [2].

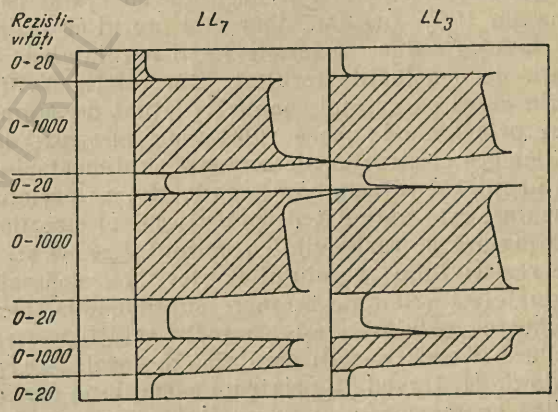


Fig. V.7. Exemple de vîrfuri de rezistivitate aparentă fictive pe curbe înregistrate cu dispozitiv laterolog 3 și 7 [2].

situație, pătrund în strat liniile de curent ale fasciculului E, dar și o parte din liniile de curent ale cîmpului de ecranare (aceasta nu este arătată în figură), ceea ce are drept rezultat creșterea fictivă a rezistivității aparente citite.

În partea din dreapta a fig. V.6 este prezentat același strat subțire și conductiv însă electrodul de curent A_0 este deasupra stratului. Traiectoria liniilor de curent ale fasciculului E este alungită și secțiunea transversală A a acestuia este mult redusă, ceea ce, conform relației V.12, are ca rezultat creșterea fictivă a rezistivității aparente citită. Prin urmare, pe diagramă va apare o rezistivitate mai mare deasupra și dedesubtul stratului conductiv. Exemple de rezistivități fictiv mai mari citite pe diagrafii laterolog-3 sînt arătate în fig. V.7. Se menționează că aceste vîrfuri fictive de rezistivitate aparentă își reduc amplitudinea pe măsura creșterii grosimii stratului conductiv.

Influența rezistivității stratului. Din analiza datelor experimentale rezultă că pentru strate groase rezistive nu există o diferență mare între rezistivitatea aparentă ρ_A și rezistivitatea ρ_g calculată după relația V.10, cînd valoarea raportului ρ_r/ρ_{ad} nu este prea mare.

Influența rezistivității noroiului de foraj. Din analiza relației V.10 rezultă că valoarea rezistivității aparente ρ_A, respectiv ρ_g, crește o dată cu creșterea rezistivității noroiului de foraj ρ_n și invers, scade dacă rezistivitatea noroiului se reduce, toate celelalte condiții rămînînd neschimbate. Cu toate acestea, din analiza diagrafiilor înregistrate în dreptul acelorași formațiuni, însă cu noroaie de rezistivități diferite, a reieșit că rezistivitatea aparentă crește cînd se fac măsurători în noroaie conductive, în comparație cu măsurătorile făcute în noroaie mai puțin conductive. Datele experimentale au arătat că această creștere este de maxim 10%. Oricum, sigur este faptul că rezistivitatea aparentă crește o dată cu reducerea rezistivității noroiului de foraj. Această inversiune față de concluziile rezultate din relația V.10 este explicată probabil prin aceea că noroiul conductiv situat deasupra și dedesubtul electrodului principal A_0 joacă rolul unor electrozi de ecranare suplimentari. Eficiența electrozilor de ecranare suplimentari este redusă, dar nu poate fi neglijată. Într-un noroi conductiv, potențialul acestor electrozi suplimentari este apropiat de potențialul electrozilor A_1 și A_2 și se mărește pe măsură ce rezistivitatea noroiului scade și, invers, scade pe măsură ce rezistivitatea noroiului crește. Ca o consecință a creșterii potențialului electrozilor de ecranare suplimentari, efectul de focalizare crește avînd ca rezultat creșterea rezistivității aparente a rocilor pe măsura reducerii rezistivității noroiului de foraj. Această inversiune este explicată de H. Guyod [2] printr-un exemplu în care consideră gaura de sondă plină cu mercur, deci cu un fluid foarte conductiv. Noroiul (mercurul) va prelua potențialul electrozilor de ecranare și întreaga coloană de noroi va apare ca un ecran infinit de gros. În asemenea condiții se va produce un fascicul, întotdeauna, perfect orizontal de grosime uniformă ($L=\overline{O_1O_2}$) și rezistivitatea aparentă măsurată va fi aproape infinită în

comparație cu rezistivitatea reală a formațiunii. Inversiunea apare și este sesizabilă cînd factorul geometric al găurii de sondă are o valoare relativ mică și anume cînd diametrul d al acesteia nu este prea mare în comparație cu diametrul dispozitivului [2].

Influența diametrului găurii de sondă. În cazul noroaielor conductive, influența diametrului găurii de sondă este neglijabilă, dacă acesta nu depășește 0,3 m (12 in) [5].

În fig. V.8 este prezentată diagrama variației raportului ρ_A/ρ_{ad} față de diametrul găurii de sondă pentru strate rezistive groase. Curbele

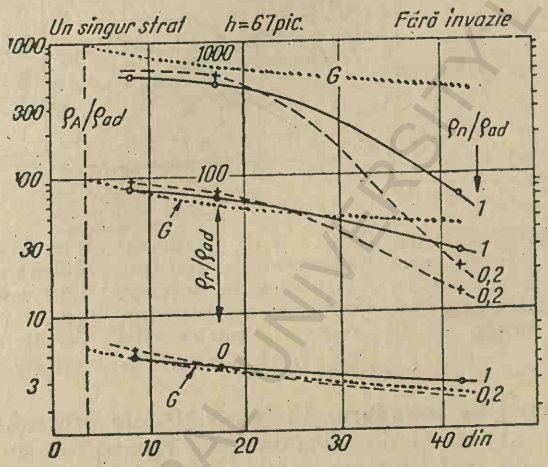


Fig. V.8. Influența diametrului găurii de sondă asupra valorii rezistivității aparente pe curbele înregistrate cu dispozitiv laterolog-3 [2].

din figură sînt obținute pentru trei valori distincte de rezistivitate și pentru două valori ale raportului $\rho_n/\rho_{ad}=1$ și $\rho_n/\rho_{ad}=0{,}2$. Curba notată cu G reprezintă variația lui ρ_g calculat cu formula factorului geometric (V.10) pentru $\rho_n/\rho_{ad}=1$. Din analiza curbelor se observă că ρ_A și ρ_g au valori asemănătoare atîta timp cît valoarea raportului ρ_r/ρ_{ad} nu este mare iar diametrul găurii de sondă are valori reduse. Pe măsură ce diametrul găurii de sondă crește, fasciculul de curent se evazează (se dispersează), reducînd valoarea rezistivităților aparente măsurate.

Influența grosimii stratelor. În dreptul stratelor rezistive subțiri individuale, datorită ecranizării, rezistivitatea aparentă se reduce. Această reducere devine din ce în ce mai pronunțată pe măsură ce grosimea stratului rezistiv scade sub 0,6 m.

— În dreptul stratelor rezistive subțiri care alternează cu strate conductive subțiri, rezistivitatea aparentă crește, deoarece vîrfurile fictive, ca acelea prezentate în fig. V.7, se unesc.

— În cazul stratelor conductive, rezistivitatea aparentă este puțin influențată de variația grosimii lor. Acest lucru este arătat în fig. V.9.

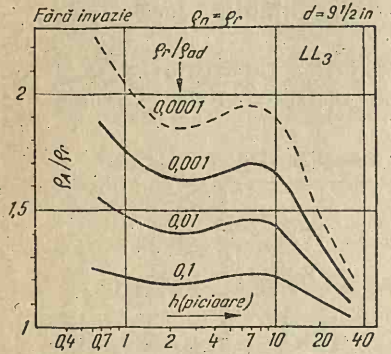


Fig. V.9. Influența grosimii stratelor asupra rezistivității aparente pe curbe înregistrate cu dispozitiv laterolog-3, pentru strate conductive [2].

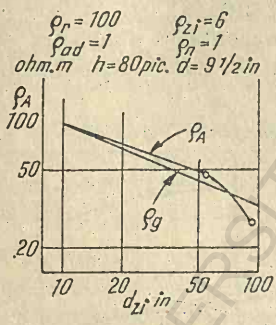


Fig. V.10. Influența diametrului și rezistivității zonei de invadare asupra rezistivității aparente a stratelor cînd $\rho_{zi} < \rho_r$ și $\rho_{ad} < \rho_r$ [2].

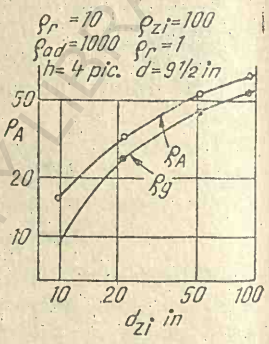


Fig. V.11. Influența diametrului și rezistivității zonei de invadare asupra rezistivității aparente a stratelor cînd $\rho_{zi} > \rho_r$ și $\rho_{ad} > \rho_r$ [2].

Influența zonei de invadare. În fig. V.10 este prezentată curba ρ_A care arată influența zonei de invadare cînd aceasta are o rezistivitate ρ_{zi} mai mică decît rezistivitatea reală a stratului ρ_r, iar formațiunile adiacente, de asemenea, au rezistivitatea ρ_{ad} mai mică decît rezistivitatea reală a stratului . În asemenea cazuri, rezistivitatea aparentă a stratului scade pe măsură ce diametrul zonei de invadare crește (curba ρ_g este desenată pentru comparație).

În fig. V.11 este prezentată curba ρ_A care arată influența zonei de invadare cînd aceasta are o rezistivitate ρ_{zi} mai mare decît rezistivitatea reală a stratului ρ_r. În asemenea cazuri, rezistivitatea aparentă crește. Această creștere este cu atît mai pronunțată cu cît rezistivitatea zonei de invadare este mai mare și cu cît d_{zi} crește. Creșterea anormal de mare a rezistivității aparente are loc cînd stratul puțin rezistiv este subțire și este situat între roci cu rezistivitate mare (curba ρ_g este desenată pentru comparație).

Determinarea grosimii stratelor. Pentru determinarea grosimii stratelor se recomandă a se folosi diagrafiile înregistrate cu microdispozitive. Totuși, cînd se determină grosimea stratelor după curbele de rezis-

tivitate aparentă înregistrate cu dispozitive laterolog-3 se recomandă a se folosi următoarele formule [1]:

— pentru stratele conductive

$h=h_A-0{,}6$ m $\}$ Din cele două formule se folosește aceea din care se
$h=0{,}5\ h_A$ $\}$ obține valoarea cea mai mare pentru h;

— pentru strate rezistive

$h=h_A+0{,}6$ m $\}$ Din cele două formule se folosește aceea din care se
$h=1{,}5\ h_A$ $\}$ obține valoarea cea mai mică pentru h.

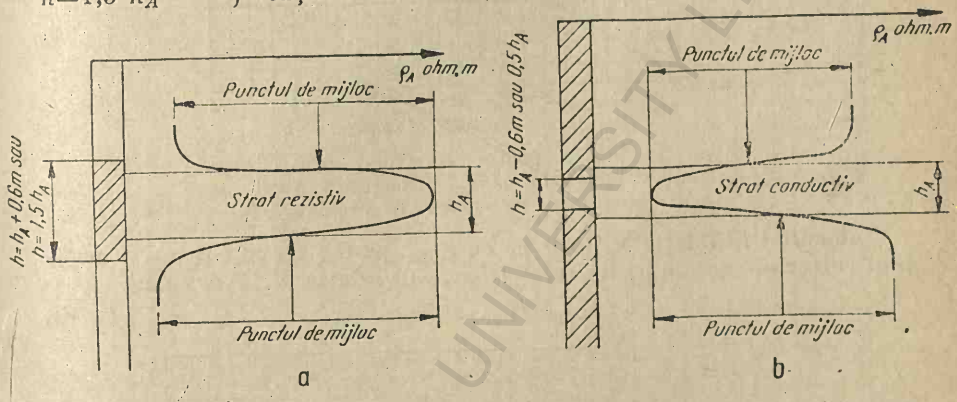


Fig. V.12. Reguli pentru determinarea grosimii aparente h_A a stratelor pe curbele de rezistivitate aparentă înregistrate cu dispozitiv laterolog-3.

În formulele de mai sus h_A este grosimea aparentă a stratului care se determină pe diagramele înregistrate cu dispozitive laterolog-3, după cum se indică în fig. V.12, *a* și *b*.

1.3. Determinarea rezistivității reale

Pentru determinarea rezistivității reale există două posibilități.

1. Utilizînd factorul geometric G_{zi}, noroiul fiind sărat. În acest caz sînt necesare două corecții: una pentru influența diametrului găurii de sondă, cînd se folosește abaca din fig. V.13, și a doua pentru influența grosimii stratelor, cînd se folosește abaca din fig. V.14. În aceste abace nu s-a ținut seama de influența zonei de invadare, însă în calculele de mai jos această influență este luată în considerare.

Rezistivitatea aparentă ρ_g, în funcție de factorii geometrici, este descrisă de relația

$$\rho_g = G_n\rho_n + G_{zi}\rho_{zi} + G_r\rho_r. \qquad (V.13)$$

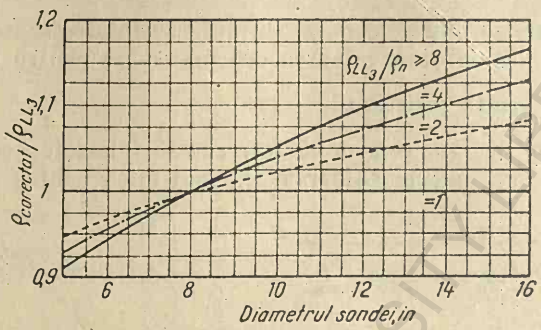


Fig. V.13. Abacă pentru corectarea rezistivității aparente datorată influenței diametrului găurii de sondă. Înregistrare cu dispozitiv laterolog-3 [1].

Înlocuind în relația V.13 pe ρ_g cu ρ_{LL3}, pe $G_{zi}\,\rho_{zi}$ cu $G_{zi}\,\rho_{xo}$ și neglijînd influența noroiului de foraj ($G_n\rho_n = 0$) relația V.13 devine:

$$\rho_{LL3} = G_{zi}\rho_{xo} + G_r\rho_r \qquad (V.14)$$

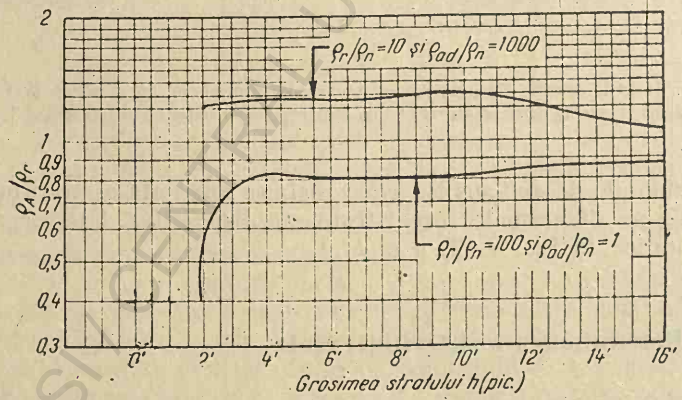


Fig. V.14. Abacă pentru corectarea rezistivității aparente datorată influenței grosimii stratelor. Înregistrare cu dispozitiv laterolog-3 [1].

Dar, cum

$$G_{zi} + G_r = 1 \qquad (V.15)$$

rezultă că $G_r = 1 - G_{zi}$. (V.16)

Înlocuind relația V.16 în relația V.14 se obține:

$$\rho_{LL3}=G_{zi}\rho_{xo}+(1-G_{zi})\rho_r. \qquad (V.17)$$

Valorile factorului geometric G_{zi} sînt date în abaca din fig. V.15. Din relația V.17 se obține ρ_r:

$$\rho_r=\frac{1}{1-G_{zi}}\rho_{LL3}-\frac{G_{zi}}{1-G_{zi}}\rho_{xo}. \qquad (V.18)$$

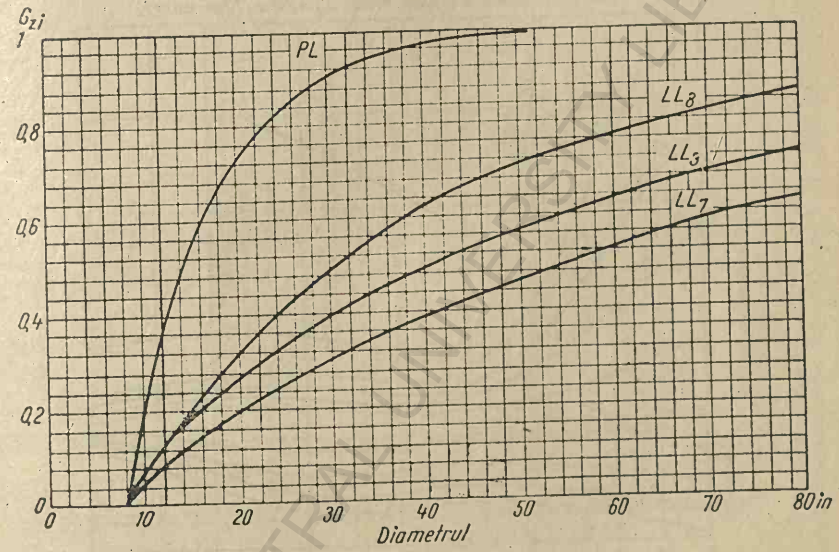


Fig. V.15. Factorul geometric integrat pentru laterolog 3, 7, 8 și proximitilog [5].

Calcularea rezistivității reale a stratelor pe această cale se recomandă numai în cazul cînd noroiul de foraj este sărat sau are rezistivitate scăzută.

2. Cînd rezistivitatea reală ρ_r diferă considerabil de ρ_{ad} se utilizează abacele din fig. V.16 și V.17.

— Rezistivitatea aparentă ρ_{LL3} a unui strat este influențată de rezistivitatea stratelor adiacente ρ_{ad}, cînd rezistivitatea stratului respectiv diferă considerabil de rezistivitatea stratelor adiacente. În acest caz, rezistivitatea aparentă ρ_{LL3} se corectează utilizînd abaca din fig. V.16.

— Rezistivitatea aparentă este influențată și de grosimea stratului. Corectarea acestei influențe se face tot cu ajutorul abacei din fig. V.16.

Pentru efectuarea corecţiei rezistivităţii după abaca din fig. V.16, sînt necesare următoarele date: rezistivitatea aparentă ρ_{LL_3} a stratului studiat (citită pe diagramă), rezistivitatea aparentă a unuia din stratele adiacente (se alege ρ_{ad} cu valoarea cea mai scăzută) şi grosimea stratului h.

Se calculează raportul ρ_{LL_3}/ρ_{ad}. Se înscrie pe abscisă grosimea stratului h, de unde se duce verticala pînă întîlneşte curba ρ_{LL_3}/ρ_{ad}, cores-

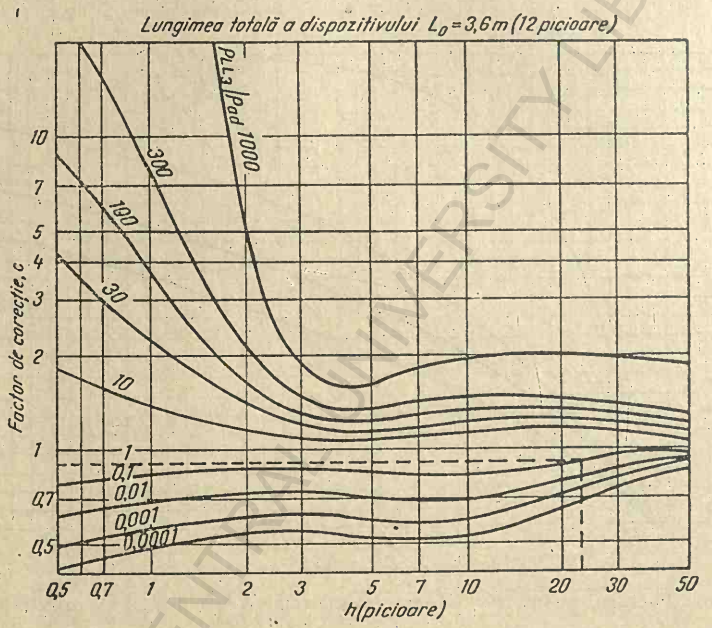


Fig. V.16. Abacă pentru corectarea rezistivităţii aparente ρ_A datorită influenţei rezistivităţii stratelor adiacente (ρ_{ad}) şi grosimei stratului studiat (h). Înregistrare cu dispozitiv laterolog-3 [3].

punzătoare şi în continuare se trasează orizontala pînă intersectează ordonata abacei pe care se va citi corecţia c.

Exemplu: ρ_{LL_3}=16,7 ohm·m ρ_{ad}=167 ohm·m şi h=23 picioare (6,9 m).

Se calculează: $\frac{\rho_{LL_3}}{\rho_{ad}} = \frac{16,7}{167} = 0,1$.

Se găseşte c=0,9 şi $\rho_{LL_3}(h)$=15 ohm·m.

Pentru determinarea rezistivităţii reale se utilizează abaca din fig. V.17. Datele necesare sînt: porozitatea ø (care se determină după

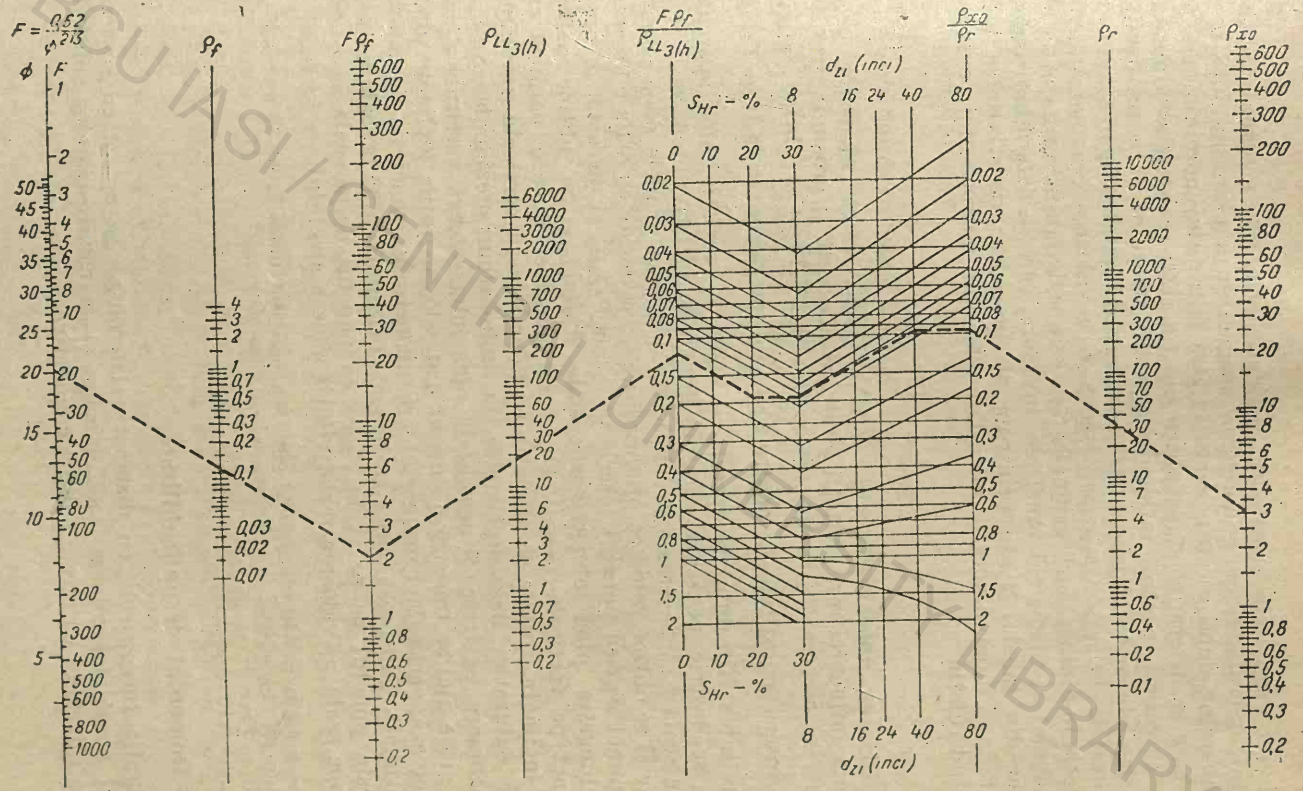


Fig. V.17. Abacă pentru determinarea rezistivității reale $\rho_{(r)}$ și a rezistivității zonei spălate (ρ_{x0}). Înregistrare cu dispozitiv laterolog-3 [3].

BCU IASI / CENTRUL DE DOCUMENTARE LIBRARY

unul din procedeele următoare: diagrafia acustică, neutronică, microcarotaj, microlaterolog, gama-gama, magnetism nuclear sau după datele de laborator după carote); rezistivitatea filtratului noroiului de foraj (ρ_f), care se determină după abaca din fig. 1.2; rezistivitatea aparentă ρ_{LL3} corectată pentru influența grosimii stratului și a rezistivității stratelor adiacente; grosimea stratului h; rezistivitatea aparentă a unuia din stratele adiacente ρ_{ad} (se alege ρ_{ad} cu valoarea cea mai scăzută); saturația în hidrocarburi reziduale S_{Hr}, care se determină conform datelor din tabelul 2; diametrul zonei de invadare, care se determină conform datelor din tabelul 2 sau printr-un alt procedeu; rezistivitatea zonei spălate ρ_{xo} după diagrafii microlaterolog sau microcarotaj, eventual utilizînd relația

$$\rho_{xo}=\frac{F\rho_f}{(1-\rho_{Hr})^2} \qquad (V.19)$$

Utilizarea abacei din fig. V.17. Rezistivitatea aparentă ρ_{LL3}, datorată influenței rezistivității stratelor adiacente și grosimii stratului studiat, se corectează utilizînd abaca din fig. V.16 și se obține $\rho_{LL3(h)}$.

Se înscrie porozitatea ø pentru $F=\frac{0{,}62}{\varnothing 2{,}15}$ pe prima scală (fig. V.17); rezistivitatea filtratului se înscrie pe scala ρ_f, rezistivitatea aparentă $\rho_{LL3(h)}$ se înscrie pe scala corespunzătoare și rezistivitatea zonei spălate pe scala ρ_{xo}. Se trasează o linie dreaptă prin primele două puncte înscrise și se obține valoarea produsului $F\rho_f$; se unește cu o linie dreaptă acest punct $F\rho_f$ cu punctul înscris pe scala $\rho_{LL3(h)}$ și această dreaptă se prelungește pînă intersectează scala $F\rho_f/\rho_{LL3(h)}$ Se obține astfel un punct pe verticala $\rho_{Hr}=0$. Din acest punct se duce o paralelă cu liniile înclinate, trasate pe abacă, pînă intersectează verticala corespunzătoare saturației dată (estimată) în hidrocarburi reziduale $S_{Hr}\%$. În continuare, se trasează orizontala pînă intersectează verticala $d_{zi}=8$ in și de aici se trasează o dreaptă paralelă cu liniile înclinate pînă intersectează verticala corespunzătoare diametrului zonei de invadare dat (estimat). Din acest punct se trasează orizontala pînă la scala ρ_{xo}/ρ_r. Se unește punctul de pe scala ρ_{xo}/ρ_r cu punctul de pe scala ρ_{xo} și se citește pe scala ρ_r valoarea rezistivității reale a stratului.

Exemplu: $\varnothing=19{,}7\%$; $\rho_f=0{,}1$ ohm·m; $\rho_{LL3}=16{,}7$ ohm·m; $h=10$ pic; $\rho_{ad}=167$ ohm·m; $S_{Hr}=20\%$; $d_{zi}=40$ in; $\rho_{xo}=3$ ohm·m.

Soluția: $F\rho_f=2$; $\rho_{LL3(h)}=15$ ohmm·.

$F\rho_f/\rho_{LL3(h)}=0{,}133$; $\rho_{xo}/\rho_r=0{,}10$; $\rho_r=30$ ohm·m.

1.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafia înregistrată cu dispozitiv laterolog-3 se aplică cu succes în cazul noroaielor mineralizate, precum și în cazul stratelor subțiri rezistive alternînd cu strate subțiri conductive.

Rezistivitatea reală se evaluează cu rezultate bune cînd:
$\rho_{xo}<3\ \rho_r$; $\rho_n/\rho_w<4$; $\rho_r/\rho_n>50$; $h>0{,}6$ m; $d<12$ in.

Dispozitivul laterolog-3 prezintă și unele inconveniente, între care:

— Rezistivitatea reală nu poate fi obținută, dacă nu se cunoaște d_{zi} și ρ_{xo}.

— Rezistivitatea reală nu poate fi obținută cu o precizie suficientă pentru stratele rezistive cu o grosime mai mică de 0,6 m.

— Nu se recomandă a se folosi în cazul noroaielor de foraj cu rezistivitate mare.

2. LATEROLOG-7

2.1. Principiul metodei, dispozitivul și schema principială de măsură

Principiul metodei laterolog-7 este schițat în fig. V.18 și V.19. Dispozitivul care se lansează în gaura de sondă are șapte electrozi din care A_0 este electrodul central, A_1 și A'_1 electrozi de focalizare, iar M, M', N și N' electrozi de măsură. Pentru obținerea cîmpului focalizat, dirijat perpendicular pe peretele găurii sondei, se emite prin A_0 un curent alternativ de intensitate constantă I_0, iar prin electrozii A_1 și A'_1 curenții de focalizare $I_1=n_1I_0$ și $I_2=n_2I_2$ de aceeași polaritate ca și I_0. Valorile n_1 și n_2 se aleg astfel încît să satisfacă relațiile

$$\Delta U=U_M-U_N=0 \qquad (V.20)$$

$$\Delta U=U_{M'}-U_{N'}=0 \qquad (V.21)$$

În acest, caz, între punctele M și N și respectiv M' și N' există cîte un punct O și respectiv O', în care componenta verticală Z a intensității cîmpului electric rezultant față de A_0, ca origine, este zero. În conformitate cu legile lui Ohm, neexistînd diferență de potențial între electrozii M și N respectiv între electrozii M' și N' pe verticală (axa sondei) nu poate să circule nici un curent. Liniile cîmpului electric ce părăsesc electrodul A_0 nu se pot dispersa pe verticală (v. fig. V.18), ci se dirijează perpendicular pe peretele găurii de sondă. Lățimea $\overline{OO'}$ reprezintă lățimea fișiei de curent focalizat sau grosimea fasciculului de curent care pătrunde în stratele investigate [2].

Planele imaginare O și O' care separă cîmpul focalizant generat de A_1 și A'_1 de cîmpul electric focalizat generat de A_0, joacă rolul determinant în desfășurarea măsurătorii, întrucît deplasarea acestor plane spre unul sau ceilalți electrozi, respectiv spre A_0 sau A_1 și A'_1 creează între electrozii de măsură M și N, respectiv M' și N' diferențe de potențial de un sens sau altul; aceste diferențe de potențial influențează regulatorul

de curent R (V. fig. V.19, *a*), care reglează curentul I_1 și I_2 de alimentare a electrozilor A_1 și A_1', restabilind echilibrul impus de condițiile de măsurare conform relațiilor V.20 și 21.

Diagrafia care se înregistrează rezultă din diferența de potențial ΔU măsurată între unul din electrozii M, M', N sau N' și electrodul îndepărtat N_1.

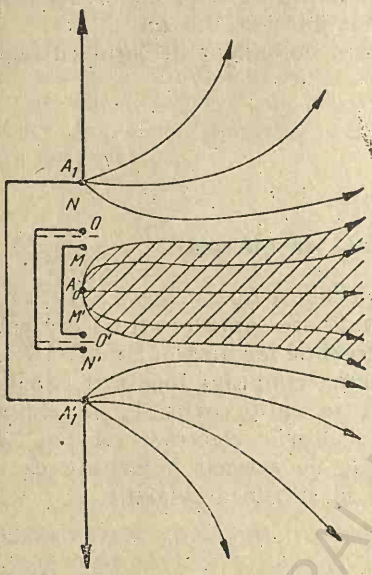


Fig. V.18. Forma schematică a cîmpului electric LL7.

Rezistivitatea aparentă măsurată se apropie de valoarea reală a rezistivității stratelor, cînd acestea au o grosime de circa 2—3 ori $\overline{OO'}$, deoarece prin satisfacerea continuă a condiției $\Delta U=0$, efectul deformant al stratelor asupra cîmpului este atenuat la un nivel minim, iar constanta electrodei, determinată pentru cîmpuri omogene, rămîne aproape constantă. Cu alte cuvinte, forma pînzei de curent I_0 nu se schimbă sub influența stratelor adiacente, cînd grosimea stratelor studiate este 2—3 ori $\overline{OO'}$.

Dispozitivul prezentat în fig. V.18 are trei scurtcircuitări și anume: A_1A_1', MM' și NN'. Aceste scurtcircuitări au fost impuse de considerente constructive, însă ele nu afectează nici principiul și nici măsurătoarea propriu-zisă.

Scurtcircuitarea electrozilor A_1 și A_1' prezintă avantajul că se poate lucra numai cu un curent I_1; valorile n_1I_0 și n_2I_0 se stabilesc de la sine, în raport invers proporțional cu rezistența de punere la pămînt a polilor A_1 și A_1' [4].

Scurtcircuitarea electrozilor M și M' respectiv N și N' este posibilă pentru că astfel chiar în cazul distribuției neomogene a rezistivităților sau a nesimetriei cîmpului față de planul $Z=0$ (A_0 origine) pot curge curenți de egalizare, asigurînd simetria punctelor O și O' față de perechile de poli $M-N$ și $M'-N'$ deci grosimea inițială a fîșiei de curent se schimbă foarte puțin [4].

Fasciculul liniilor de curent ce părăsește electrodul A_0 este reprezentat hașurat în fig. V.18 și este dirijat perpendicular pe peretele găurii sondei. Distanța pînă la care aceste linii de forță își vor păstra paralelismul este determinată în primul rînd de distanțele $\overline{A_1O}$ respectiv $\overline{A_1'O'}$. Practic, această distanță caracterizează adîncimea de pătrundere a fasciculului de curent emis de electrodul A_0.

Cîmpul de măsură al dispozitivelor laterolog-7 poate fi caracterizat prin:

— grosimea fasciculului sau pînzei de curent $\overline{OO'}$;

— modulul de extindere (denumit și modul de focalizare) exprimat prin relația:

$$q=\overline{A_1A_1'}/\overline{OO'}. \qquad (V.22)$$

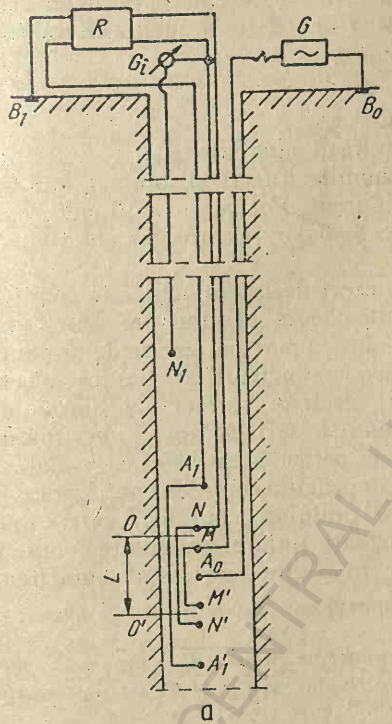


Fig. V.19. *a* — Schema principială de măsură a rezistivității aparente utilizînd dispozitiv laterolog-7; *b* — Schema de montare a rezistenței R_{sh} pentru a se obține diagrafii laterolog-7 în scară comprimată:

A_0, B_0 — electrozi de curent (alimentare); B_1 — electrod de curent (baraj); M, M', N, N', N_1 — electrozi de măsură; A_1, A_1' — electrozi de ecranare; R — element de compensare; G_l — galvanometru înregistrator; G — generator de curent; I_0 — curent de alimentare; I_{sh} — curent datorită șuntului R_{sh}.

Pentru electrode avînd aceeași grosime a pînzei de curent $\overline{OO'}$, cu cît este mai mare modulul de extindere cu atît este mai mare pătrunderea radială. Valoarea modulului de extindere, la o serie de dispozitive folosite în mod curent este $2{,}5<q<6{,}25$.

Un alt parametru important este raportul curenților, notat cu n. El exprimă raportul dintre curentul I_1 și curentul I_0 și provine din satisfacerea condiției de măsurare $\Delta U=0$.

După V. N. Dahnov, valoarea lui n este dată de relația

$$n=\frac{I_1/2}{I_0}=\frac{\overline{A_1M}\cdot\overline{A_1N}\cdot\overline{A_1'M}\cdot\overline{A_1'N}}{\overline{A_0M}\cdot\overline{A_0N}\cdot(\overline{A_1'M}-\overline{A_1'N}-\overline{A_1M}\cdot\overline{A_1N})} \qquad (V.23)$$

Pe lîngă formula stabilită de V. N. Dahnov se mai utilizează și o altă relație mai simplă și anume:

$$n=\frac{(\rho^2-1)^2}{4} \qquad (V.24)$$

în care ρ este rezistivitatea aparentă.

Dispozitivul de măsură se mai caracterizează prin:

— constanta electrodei, care se deduce fie pe cale experimentală fie din relația care exprimă rezistivitatea specifică a mediului măsurat:

$$\rho=K\frac{\Delta U_{M(N)}}{I}; \qquad (V.26)$$

— lungimea totală a dispozitivului $\overline{AA'_1}$;

— punctul de raportare al rezistivității aparente A_0.

Dispozitivele laterolog-7* sînt denumite diferit și anume: în S.U.A. laterolog-7 (LL7) — Schlumberger; Curent Focused Log-Lane Wells; Laterolog LL7 — P.G.A.C.; în U.R.S.S. bokovîi carotaj-7; în România laterolog-7 (prescurtat LL7).

Analiza critică a cîmpului electric creat de laterologul-7 în condițiile găurii de sondă arată că presupunerile făcute privind omogenitatea și liniaritatea conductibilității în cîmp sînt numai parțial reale și anume:

— În timp ce mediul investigat are conductibilitate ionică, electronică sau mixtă, în general, contactul electric „perfect" la limita fazei metal-electrolit nu se realizează în condiții satisfăcătoare unei măsurători corespunzătoare, întrucît apare o peliculă apoasă, care, față de curentul alternativ de lucru, prezintă o impedanță complexă neliniară z_c (4).

Din cauza existenței impedanțelor neliniare, curenții care circulă prin poli întîmpină, în locul unor rezistențe liniare, rezistențe complexe, care nu pot fi neglijate, ba chiar, la frecvențe mari, sînt hotărîtoare.

* În funcție de dispunerea electrozilor punctiformi, dispozitivele laterolog-7, sînt denumite diferit:

— dispozitiv standard, la care: lățimea pînzei de curent $\overline{OO'}=0{,}6$ m; raportul de extindere $q=3{,}2$; lungimea totală a dispozitivului $\overline{A_1A'_1}=1{,}92$ m; constanta $K=0{,}671$ m; raportul curenților $n=13{,}7$; $I_0=6{,}71$ mA; $I_1=91{,}3$ mA;

— dispozitiv optimal, la care: lățimea pînzei de curent $\overline{OO'}=0{,}8$ m; raportul de extindere $q=2{,}5$; lungimea totală a dispozitivului $\overline{A_1A'_1}=2{,}0$ m; constanta $K=1{,}31$ m; raportul curenților $n=5{,}68$; $I_0=13{,}1$ mA; $I_1=74{,}5$ mA;

— dispozitiv pentru detaliere, la care: lățimea pînzei de curent $\overline{OO'}=0{,}16$ m; raportul de extindere $q=6{,}25$; lungimea totală a dispozitivului $\overline{A_1A'_1}=1$ m; constanta $K=0{,}0461$ m;

— dispozitiv de mare pătrundere, la care: lățimea pînzei de curent $\overline{OO'}=0{,}6$ m, raportul de extindere $q=5$; lungimea totală a dispozitivului $\overline{A_1A'_1}=3$ m; constanta $K=0{,}3$ m; raportul curenților $n=58{,}9$; $I_0=3$ mA; $I_1=177$ mA;

— dispozitiv pseudolaterolog, la care: lățimea pînzei de curent $\overline{OO'}=0{,}6$ m; raportul de extindere $q=2$; lungimea totală a dispozitivului $\overline{A_1A'_1}=1{,}2$ m; constanta $K=1{,}77$ m; raportul curenților $n=2{,}33$; $I_0=17{,}7$ mA; $I_1=41{,}2$ mA.

Caracterul complex al impedanței Z_c poate duce la funcționarea instabilă a sistemului de focalizare, întrucît, din cauza impedanțelor, pot apare curenți defazați față de curentul I_1 și deci potențiale eronate.

O oarecare atenuare a neliniarității rezistențelor de contact și deci a cîmpurilor, se poate obține prin cîteva procedee din care se amintesc:

— mărirea într-o oarecare măsură a suprafeței metalice de contact a polilor, cu rezerva că o mărire exagerată contrazice condiția inițială ca polii electrodeř să fie punctiformi, ceea ce poate duce la erori chiar mai mari;

— introducerea unor rezistențe de stabilizare în circuitul de legătură a polilor MM' și NN'.

Toate soluțiile au un dezavantaj comun, anume că introduc importante rezistențe pe circuitele pe care circulă curenți foarte slabi (circuitul de măsură), rezistențe care conduc la reducerea selectivității, precum și la atenuarea și aplatizarea contrastelor de rezistivitate [4].

Un al doilea dezavantaj al dispozitivului laterolog-7 rezidă din faptul că maximum de curent de focalizare (gardă) este de 500 mA. În cazul cînd este necesar un curent de focalizare mai mare de 500 mA, nu se mai restabilește echilibrul impus de condiția de măsurare conform relațiilor V.20 și 21, și în consecință focalizarea nu mai este corectă, iar curba obținută tinde să semene cu o curbă potențială.

În cazul formațiunilor în care sînt contraste mari de rezistivitate, se montează un șunt R_{sh} după cum este indicat în fig. V.19 *b*, însă în acest caz scara nu mai este liniară, ea fiind comprimată.

Utilizînd schema din fig. V.19 *b* se observă că dacă $\rho_A \to \infty$ atunci $I_{B_0} \to 0$, dar curentul I_{sh} continuă să existe. În aceste condiții se reglează galvanometrul înregistrator să indice 100 diviziuni. Deci rezistibilitățile de la 0 ohm.m la ∞ vor fi cuprinse între 0 și 100 diviziuni. Rezistivitatea aparentă ρ_A se va calcula cu relația

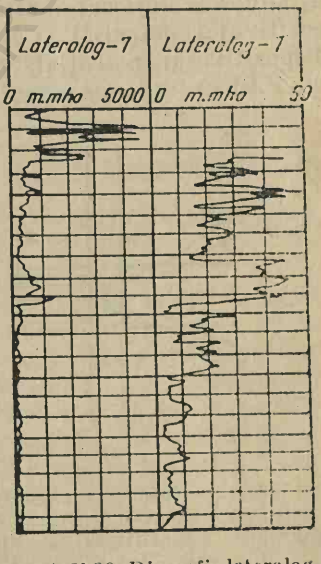


Fig. V.20. Diagrafie laterolog-7 în scară comprimată.

$$\rho_A = K R_{sh} \frac{S}{100 - S} \qquad (V.26)$$

în care K este constanta dispozitivului; R_{sh} — valoarea șuntului; S — deflecțiunea în diviziuni a galvanometrului. (Pentru $S=50$ diviziuni se obține rezistivitatea aparentă la mijlocul scalei $\rho_A = K R_{sh}$.)

În fig. V.20 este prezentată o diagrafie laterolog-7 în scară comprimată (ρ_A=500 ohm·m).

2.2. Interpretarea calitativă

Interpretarea calitativă a diagrafiilor laterolog-7 este similară cu a diagrafiilor înregistrate cu dispozitiv laterolog-3. În continuare, se fac următoarele completări privitor la efectul grosimii stratelor subțiri în investigarea cu dispozitive laterolog-3, 7 și efectul diametrului găurii sondei.

Influența grosimii stratelor subțiri asupra diagrafiilor înregistrate cu dispozitive laterolog-3 și 7 este redusă în comparație cu efectul acestora asupra diagrafiilor clasice de rezistivitate. Această influență este reprezentată schematizat în fig. V.21, *a* și *b*, în care se prezintă distribuția liniilor de forță ale cîmpului electric emis de electrodul de curent *A*, situat la mijlocul unui strat subțire și rezistiv în cazul utilizării dispozitivului potențial și a dispozitivului laterolog-3 sau 7. În cazul dispozitivului potențial, curentul nefiind focalizat (partea stîngă a ig. V.21 *a*) liniile de curent diverg din *A* în toate direcțiile și sînt atrase

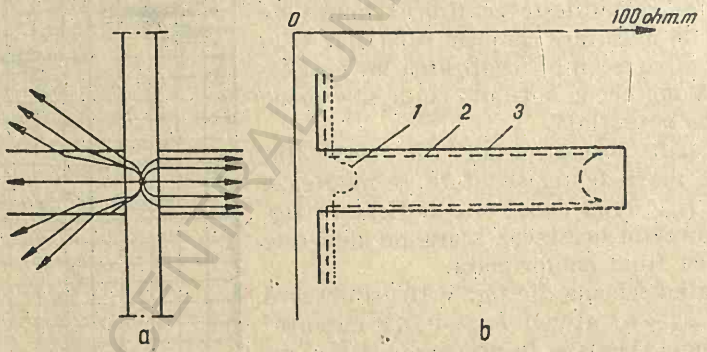


Fig. V.21. *a* — Schemă comparativă între liniile de forță ale cîmpului electric focalizat și ale cîmpului electric utilizînd dispozitiv potențial; *b* — Comparație între răspunsurile dispozitivului laterolog — 3 sau 7 și ale dispozitivului potențial în cazul unui strat subțire și rezistiv situat între strate conductoare:
1 — curbă potențială; *2* — curbă laterolog — 3 sau 7; *3* — curba ideală (ρ_r).

în mod clar de către formațiunile învecinate mai conductive și ca urmare în dreptul stratului rezistiv va rămîne un număr redus de linii de curent (efectul de bypass) și rezistivitatea aparentă citită în fața stratului este mult mai mică decît rezistivitatea reală. În cazul dispozitivului latero-

log, majoritatea liniilor de curent pătrund în strat la o distanță anumită. Astfel, rezistivitatea aparentă citită în fața stratului este mult mai apropiată de rezistivitatea sa reală.

Curbele de rezistivitate aparentă înregistrate cu dispozitiv laterolog-7 sînt puțin influențate de mărimea diametrului găurii de sondă și această

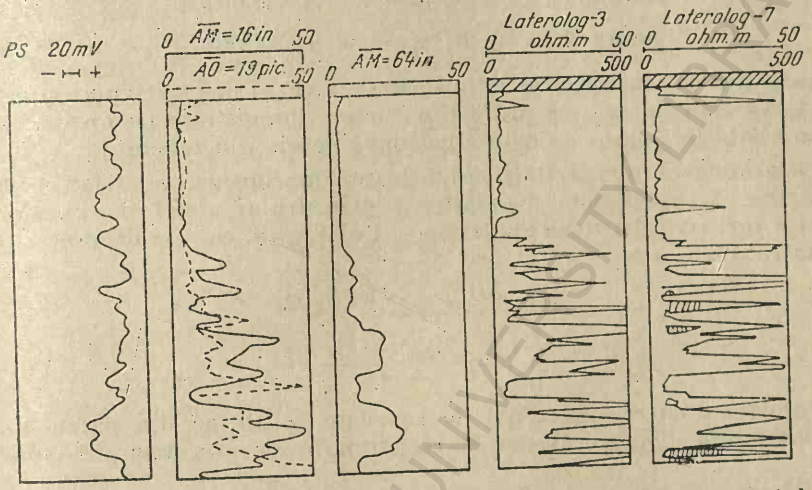


Fig. V.22. Exemplu de diagrafii clasice de rezistivitate (înregistrare în noroi dulce) și diagrafii laterolog —3 și 7 (înregistrare în noroi sărat) [1].

influență se neglijează pînă la un diametru de 16 in, chiar în cazul valorilor mari ale raportului ρ_r/ρ_n.

În fig. V.22 se prezintă un exemplu de diagrafii înregistrate cu dispozitive clasice de rezistivitate (înregistrare în noroi dulce) și diagrafii laterolog-3 și 7 (înregistrare în noroi sărat). Se observă că diagrafiile laterolog-3 și 7 evidențiază mai bine stratele subțiri. De asemenea, se observă că rezistivitățile aparente măsurate pe diagrafia laterolog-7 sînt mai mari decît cele măsurate pe diagrafia laterolog-3. Astfel, dacă ne referim la stratul subțire de la partea superioară a fig. V. 22 pe diagrafia laterolog-3 se citește o rezistivitate aparentă =18 ohm·m, iar pe diagrafia laterolog-7 se citește 50 ohm·m. Pe diagrafiile clasice de rezistivitate, majoritatea stratelor subțiri nu sînt evidențiate.

2.3. Determinarea rezistivității reale

Determinarea rezistivității reale după diagrafii laterolog-7 se realizează fie după abace, fie luîndu-se în considerare factorul geometric G_{zi}.

Abacele construite de firma Schlumberger (documentația nr. 6) pentru determinarea rezistivității reale după diagrafii laterolog-7 pot fi redate simplist prin relațiile de mai jos:

$$\text{pentru } d_{zi}=20 \text{ in: } \rho_r=1{,}25\ \rho_A=0{,}25\ \rho_{x0} \tag{V.27}$$

$$\text{pentru } d_{zi}=40 \text{ in: } \rho_r=1{,}66\ \rho_A-0{,}66\ \rho_{x0} \tag{V.28}$$

$$\text{pentru } d_{zi}=80 \text{ in: } \rho_r=2{,}50\ \rho_A-1{,}50\ \rho_{x0} \tag{V.29}$$

Relațiile de mai sus sînt aplicabile și în cazul dispozitivului laterolog-3. Valorile lui ρ_{x0} se obțin din curbele înregistrate cu dispozitive micro. Valorile lui d_{zi} se determină după datele din tabelul 2.

Determinarea rezistivității prin luarea în considerare a factorului geometric G_{zi} presupune cunoașterea diametrului zonei de invadare d_{zi} și a rezistivității zonei spălate ρ_{x0}. Relația din care se deduce rezistivitatea reală este

$$\rho_{LL7}=G_{zi}\rho_{x0}+(1-G_{zi})\rho_r \tag{V.30}$$

$$\rho_r=\frac{\rho_{LL7}-G_{zi}\rho_{x0}}{1-G_{zi}} \tag{V.31}$$

Valoarea diametrului zonei de invadare se obține din datele din tabelul 2, din diagrafii clasice de rezistivitate sau din diagrafii inductive.

Valoarea rezistivității zonei spălate se obține din diagrafii micro sau din curba de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv normal 16 in, în cazul existenței unei zone de invadare mai mare de 2,5 m în dreptul unui strat saturat 100% cu apă de zăcămînt.

Valoarea factorului geometric G_{zi} se obține din abaca fig. V.15.

2.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafia laterolog-7 se aplică cu succes în cazul noroaielor puternic mineralizate și în cazul sondelor ce traversează roci cu rezistivitate mare intercalate de roci cu rezistivitate redusă. Investigări optime se obțin în următoarele cazuri:

1) cînd $\rho_n/\rho_w<5$; în această situație, în majoritatea cazurilor, se creează o turtă de noroi subțire și un diametru al zonei de invadare în general constant, care suferă modificări reduse în timp;

2) cînd $\rho_{x0}<\rho_r$ și $\rho_r/\rho_n>50$.

Cînd sînt îndeplinite condițiile de mai sus, curbele de rezistivitate aparentă înregistrate cu dispozitiv laterolog-7 se recomandă a fi utilizate pentru determinarea lui ρ_r.

Nu se folosește în cazul noroaielor de foraj cu rezistivități mari.

3.1. Principiul metodei

Investigarea cu dispozitiv laterolog-8 este recent introdusă de firma Schlumberger. Dispozitivul de măsură este asemănător cu laterologul-7, cu deosebirea că electrodul de curent B_0 este plasat la o distanță mică față de cei șapte electrozi (A_0, M, N, M', N', A_1, A_1'), constituindu-se astfel un dispozitiv de măsură cu 8 electrozi, de unde și denumirea de laterolog-8. Caracteristicile acestuia sînt: lungimea dispozitivului $L = \overline{OO'} \approx 0{,}35$ m (14 in); lungimea totală a dispozitivului $L_0 \approx 1$ m (40 in). Cu dispozitivul laterolog-8 se urmărește să se măsoare rezistivitatea zonei invadate ρ_{zi} în condițiile foarte diferite întîlnite în gaura de sondă.

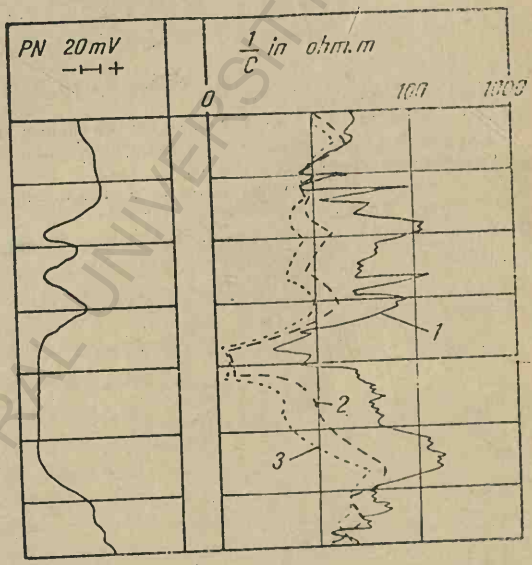


Fig. V.23. Diagrafie de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv laterolog-8 (curba *1*) comparativ cu înregistrările cu dispozitivele inductive 5FF-40 (curba *2*) și 6FF-40 (curba *3*) (diagrafie Grand-Slam).

Acest lucru este posibil deoarece raza de investigare a dispozitivului variază între 0,25 m (10 in) și 1,27 m (50 in).

Răspunsul dispozitivului este similar cu al dispozitivului normal scurt (16 in), cu deosebirea că se elimină efectul noroiului de foraj, curentul fiind focalizat.

În fig. V.23 este prezentată o diagrafie înregistrată cu dispozitivul laterolog-8 și, pentru comparare, două curbe de rezistivitate aparentă înregistrate cu dispozitive inductive 5FF-40 și 6FF-40. Se constată că rezistivitățile aparente înregistrate cu dispozitivul laterolog-8 sînt mai mari decît cele înregistrate cu dispozitivele inductive.

3.2. Determinarea rezistivității reale

La fel ca în cazul dispozitivelor laterolog-3 și 7, dacă se cunoaște diametrul zonei de invadare d_{zi} se determină factorul geometric G_{zi} utilizînd abaca din fig. V.15 și atunci se poate determina ρ_r, urmînd a calcula rezistivitatea zonei spălate ρ_{xo} după una din curbele de rezistivitate aparentă înregistrată cu microdispozitive. Relația cu care se calculează ρ_r este:

$$\rho_r=(\rho_{LL8}-G_{zi}\rho_{xo})/1-G_{zi} \qquad (V.32)$$

BIBLIOGRAFIE

1. Pirson, Sylvain, J. **Handbook of Well log Analysis for Oil and Gas Formation Evaluation**, 1963, pp. 141—157.
2. Guyod, H. **Factors Affecting the Responses of Latterolog-Type Logging Sistems LL_3 and LL_7**: Journal of Petroleum Technology, februarie, 1964.
3. **Loganalysis Handbook**, P.G.A.C., 1966.
4. Sabados Gh. **Carotaj focalizat-laterolog.** Proiect tehnic nr. 271/267, I.P.C.U.P., 1965, pp. 2—15.
5. Schlumberger. **Log Interpretation Principles**, April, 1966.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CAPITOLUL VI

MICROLATEROLOG ŞI PROXIMITILOG

1. MICROLATEROLOGUL

Acest microdispozitiv a fost realizat de firma Schlumberger în anul 1952 şi se utilizează pentru evidenţierea stratelor subţiri şi pentru determinarea rezistivităţii zonei spălate ρ_{x0}, cînd noroiul este sărat, determinări care nu sînt posibile cu dispozitivul de microcarotaj.

1.1. Principiul metodei, dispozitivul şi schema principială de măsură

Diagrafiile microlaterolog, ca şi cele de microcarotaj, fac parte din grupa metodelor care măsoară microvolume din formaţiune. Forma microvolumului investigat seamănă, mai mult sau mai puţin, cu o trompetă. Microlaterologul însumează trăsăturile caracteristice ale dispozitivelor „micro" şi ale dispozitivelor laterolog.

Dispozitivul de măsură conţine două patine: pe una (confecţionată din material izolant) sînt montaţi electrozii inelari M_1, M_2 şi A_1, care sînt dispuşi concentric faţă de electrodul principal A_0 (v. fig. VI.1); a doua serveşte pentru presarea patinei cu electrozi pe peretele găurii sondei (astfel se elimină influenţa noroiului). Cu acest gen de aparat se înregistrează, simultan cu diagrafia microlaterolog, şi microcavernograma, care se înscrie pe pista diagramei rezervată obişnuit potenţialului spontan.

Dispozitivele microlaterolog sînt denumite diferit, în funcţie de unităţile operatoare: microlaterolog (MLL) — Schlumberger, P.G.A.C. şi Bird-Well; minifocused-log (MFL), Lane-Vells; F_0R_{x0}-Wellex. În România microlaterolog (MLL).

Dată fiind distanţa mică dintre electrozi, se investighează un microvolum care, în majoritatea cazurilor, nu depăşeşte zona de invadare. Diametrul electrodului M_1 este în jur de 38 mm, iar diametrul electrodului M_2 de 50 mm.

Electrodul A_0 este alimentat cu un curent alternativ I_0, a cărui intensitate este menținută constantă în timpul măsurării. Prin electrodul inelar A_1 circulă un curent de ecranare I_1 de aceeași polaritate cu I_0.

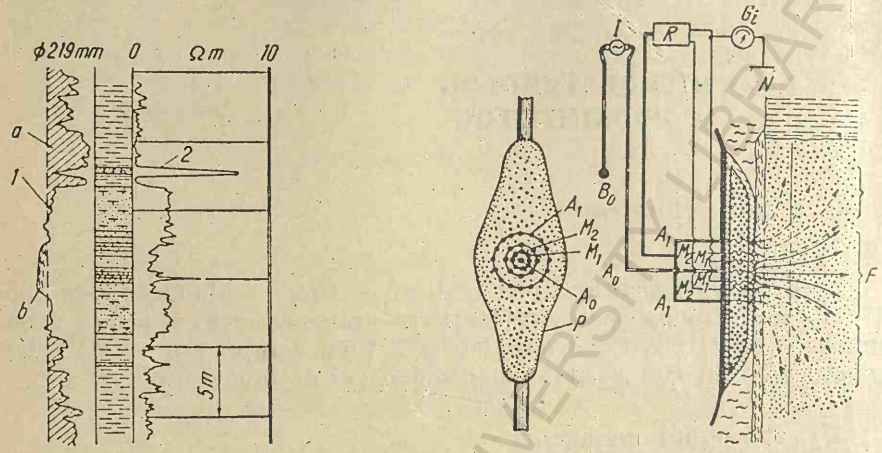


Fig. VI.1. Schema principială de măsură a ρ_A în investigarea cu dispozitiv microlaterolog:

A_0, B_0 — electrozi de curent; A_1 — electrod de ecranare; M_1, M_2, N — electrozi de măsură; I — sursă de curent; R — element de reglare a curentului electrodului A_1; Gi — galvanometru înregistrator; 1 — cavernograma; 2 — diagrama înregistrată cu dispozitiv microlaterolog; a — cavernă; b — turtă de noroi.

Intensitatea curentului I_1 este reglată automat (prin intermediul regulatorului R), încît să se satisfacă relația

$$\Delta U = U_{M_1} - U_{M_2} = 0 \qquad \text{(VI.1)}$$

În această situație, între electrozii de măsură M_1 și M_2, se creează o zonă inelară, în care diferența de potențial este zero.

Curentul I_0 emis de electrodul central A_0 este focalizat de curentul I_1 emis de electrodul A_1. Fasciculul de curent ce se creează este astfel canalizat perpendicular pe peretele găurii de sondă. Lățimea fasciculului de curent este limitată la jumătatea distanței dintre electrozii M_1 și M_2, respectiv $\overline{O_1O_2}$ (v. fig. VI.1).

Fasciculul de curent inițial, la ieșirea din dispozitivul de măsurare, are o formă cilindrică cu diametrul între 38 și 50 mm, iar axa cilindrului este perpendiculară pe peretele găurii de sondă. La o distanță de aproximativ 75 mm, fasciculul se răspîndește sub forma unei trompete, de unde și denumirea inițială dată acestui dispozitiv.

Porțiunea din strat investigată cu microlaterologul este zona spălată și o parte din zona invadată.

Diferența de potențial se măsoară între unul din electrozii de măsură M_1 sau M_2 și corpul aparatului, care constituie electrodul N.

Caracteristicile dispozitivului sînt: lățimea fasciculului de curent = $=\overline{O_1O_2}$; lungimea dispozitivului = diametrul electrodului inelar A_1; raportul de extindere sau modulul de focalizare:

$$q = \text{diametrul lui } A_1/\overline{O_1O_2} \qquad \text{(VI.2)}$$

În fig. VI.2 este prezentată o diagrafie de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv microlaterolog într-o alternanță de marne și gresii. Deoarece pe diagrafiile microlaterolog se măsoară în unele cazuri direct rezistivitatea zonei spălate (ρ_{xo}), se obișnuiește a se prezenta atît curba de conductivitate cît și reciproca ei.

1.2. Interpretarea calitativă

Pe curbele înregistrate cu dispozitive microlaterolog sînt evidențiate clar stratele rezistive și limitele acestora. În dreptul cavernelor cu diametru mare, rezistivitatea aparentă citită pe curba microlaterolog este apropiată de rezistivitatea noroiului de foraj, deoarece adîncimea de investigare a dispozitivului este în jur de numai 75—100 mm.

Referindu-ne la fig. VI.2, pe curba conductivității stratele subțiri rezistive sînt reprezentate prin anomalii ale căror amplitudini indică valori mici de conductivitate, iar pe curba reciprocă valori mari de rezistivitate (cazul stratului notat cu *3* pe figură). Marnele sînt reprezentate pe curba conductivității prin anomalii ale căror amplitudini indică valori mari de conductivitate, iar pe curba reciprocă valori mici de rezistivitate (cazul intervalului notat pe figură cu *2*). S-a arătat că în cazul cavernelor cu deschidere mare, rezistivitatea ce se măsoară este apropiată de aceea a noroiului de foraj (cazul intervalelor notate cu *1* și *4* pe figură). În vederea separării cavernelor, atît pe curba conductivității cît și pe curba reciprocă se trasează linia de bază a marnelor. În felul acesta, atît pe curba conductivității cît și pe curba reciprocă, anomaliile care depășesc linia de bază a marnelor (←) indică prezența cavernelor. (Acest lucru este mai evidențiat pe curba conductivității).

Diagrafiile microlaterolog nu sînt influențate de noroiul de foraj, atît timp cît patina cu electrozi este etanșă pe peretele găurii de sondă.

Rezistivitatea rocilor din zona necontaminată nu influențează măsurătorile, dacă zona invadată este mai mare de 3—4 in se urmărește să se determine ρ_{xo}.

Rezistivitatea stratelor adiacente și grosimea lor nu influențează măsurătorile.

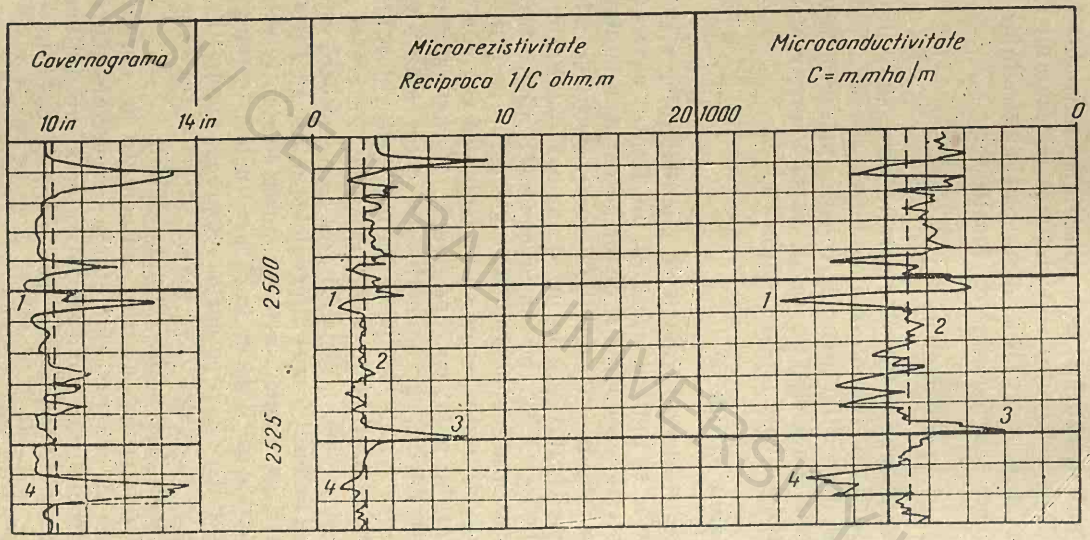


Fig. VI.2. Diagrafie înregistrată cu dispozitiv microlaterolog într-o formațiune constituită dintr-o alternanță de gresii și marne:

1—4 — caverne; *2* — argile; *3* — strat rezistiv subțire.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

1.3. Interpretarea cantitativă

În cazul diagrafiei microlaterolog, prin interpretare cantitativă se înțelege determinarea în prima etapă a rezistivității zonei spălate ρ_{xo}, în vederea determinării în a doua etapă a factorului de rezistivitate a formațiunii F, din relația

$$\rho_{xo}=F\cdot\rho_f \qquad \text{(VI.3)}$$

și a porozității din relațiile:

$$F=\rho_{xo}/\rho_f=1/\varnothing^2 \qquad \text{(VI.4)}$$

Determinarea lui ρ_{xo}. Rezistivitatea aparentă măsurată cu dispozitivul microlaterolog este influențată de rezistivitatea turtei de noroi. Cînd turta de noroi are o grosime mai mică de 12 mm, se poate considera că $\rho_{MLL}=\rho_{xo}$. Cînd grosimea acesteia este mai mare de 12 mm, rezistivitatea aparentă ρ_{MLL} trebuie corectată; în acest scop se utilizează abaca din fig. VI.3. Datele necesare pentru corectarea lui ρ_{MLL} sînt: ρ_{MLL}, care se citește pe diagrafie; ρ_{tn} — rezistivitatea turtei de noroi la temperatura stratului; h_{tn} — grosimea turtei de noroi (după macrocavernogramă).

Pentru efectuarea corecției rezistivității aparente se calculează raportul ρ_{MLL}/ρ_{tn} și valoarea obținută se înscrie pe abscisa abacei din fig. VI.3, de unde se ridică verticala pînă intersectează curba corespunzătoare.

Exemplu: $\rho_{MLL}=42$ ohm·m; $\rho_{tn}=0{,}70$ ohm·m; $h_{tn}=5/8$ in.
Soluția: Se calculează ρ_{MLL}/ρ_{tn} și se găsește $=6$; factorul de corecție este 1,2 și $\rho_{xo}=50{,}4$ ohm·m.
Cunoscînd pe ρ_{xo}, pentru determinarea lui F și $\varnothing$ se folosește abaca din fig. IV.8, al cărei mod de utilizare a fost descris la cap. IV.

1.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafiile înregistrate cu dispozitiv microlaterolog se utilizează preferențial pentru determinarea rezistivității zonei spălate ρ_{xo} și a porozității $\varnothing$, cînd noroiul este sărat.

Pe diagrafiile înregistrate cu dispozitiv microlaterolog se pot determina grosimile stratelor permeabile și a stratelor subțiri rezistive.

Diagrafiile înregistrate cu dispozitiv microlaterolog evidențiază bine stratele subțiri de lignit, care pot fi utile ca repere pentru corelare.

2. PROXIMITILOGUL

În anul 1958 a fost construit în S.U.A. de către Societatea Schlumberger un dispozitiv similar cu microlaterologul, care a fost denumit *proximitilog* [1]. Se va nota prescurtat PL iar rezistivitatea aparentă ρ_{PL}.

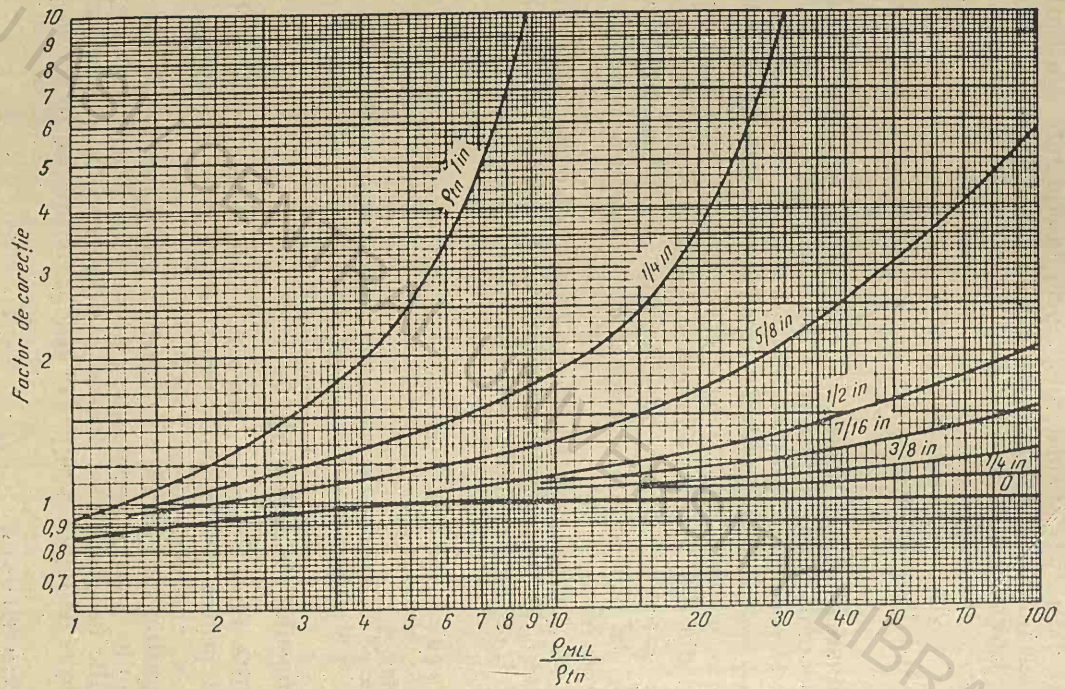


Fig. VI.3. Abacă pentru corectarea rezistivității aparente datorată influenței grosimii turtei de noroi. Înregistrare cu dispozitiv microlaterolog.

2.1. Dispozitivul de măsură

Măsurarea rezistivității zonei din apropierea găurii de sondă se realizează cu ajutorul unui dispozitiv de fund la care electrozii, ca și la microlaterolog, sînt montați pe o patină din material izolant, care este presată pe peretele găurii de sondă. Lățimea fasciculului de curent este de aproximativ 150 mm, iar adîncimea de investigare dincolo de peretele găurii de sondă este de circa 410 mm [3, 4]. Schema de înregistrare este similară cu aceea utilizată în cazul dispozitivului microlaterolog.

2.2. Interpretarea calitativă

Dispozitivul măsoară direct rezistivitatea zonei invadate. El este proiectat în așa fel încît poate funcționa corect în fluide de foraj atît sărate cît și dulci. Diagrafiile înregistrate cu dispozitive de proximitate

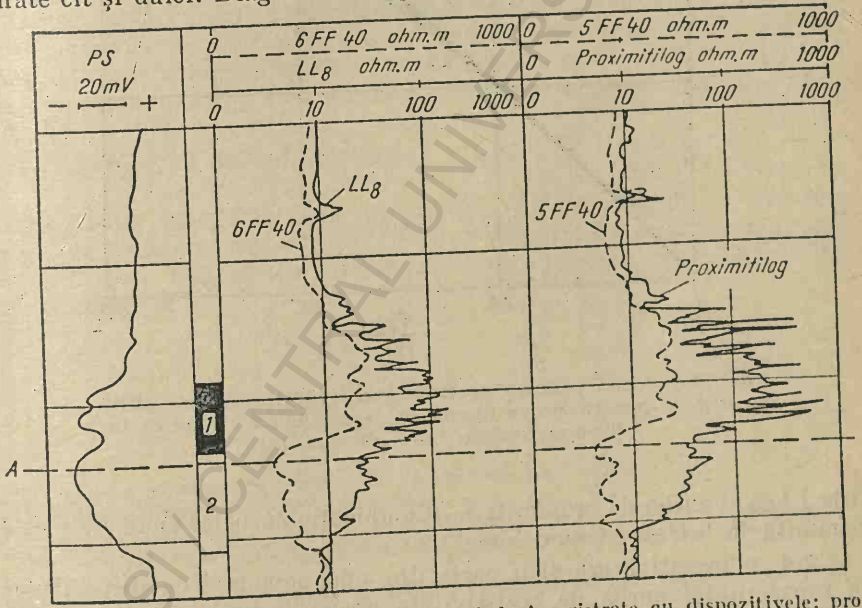


Fig. VI.4. Diagrafie complexă cuprinzînd curbele înregistrate cu dispozitivele: proximitilog, laterolog LL-8, inductiv 5FF-40 și 6FF-40 [1]:
1 — strat petrolifer; *2* — strat acvifer.

sînt mai puțin detaliate decît diagrafiile înregistrate cu microlaterologul, iar valorile de rezistivitate sînt mai puțin influențate de grosimea turtei de noroi.

În fig. VI.4 este prezentată o diagrafie complexă, în care sînt trasate următoarele curbe: curba PS, două curbe de inducţie înregistrate cu dispozitivele 6FF-40 şi 5FF-40, o curbă laterolog înregistrată cu dispo-

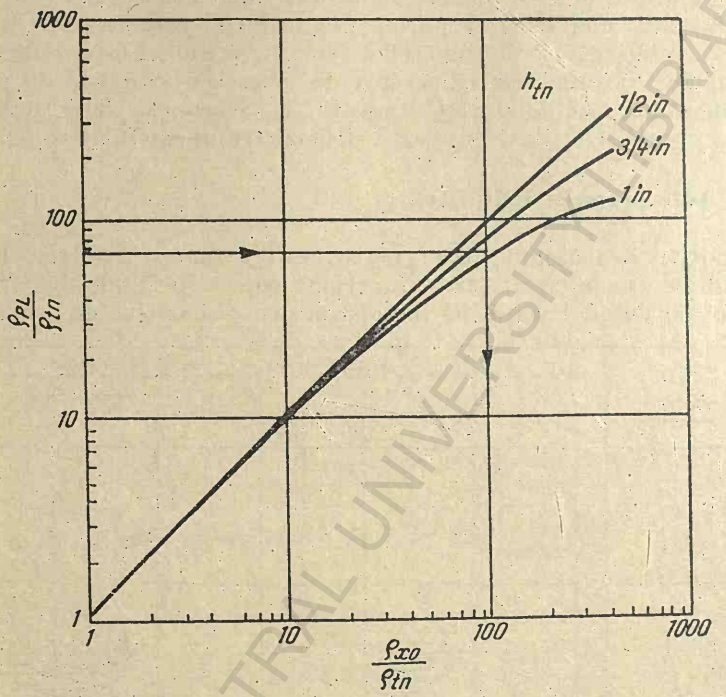


Fig. VI.5. Abacă pentru corectarea rezistivităţii aparente citită pe curbele înregistrate cu dispozitiv de proximitate datorită influenţei grosimii turtei de noroi [5].

zitiv LL-8 şi curba de proximitate. (Combinaţia curbelor enumerate este denumită în S.U.A. „Grand Slam").

Cînd se investighează şi o parte din zona invadată cu dispozitivul de proximitate, curba de rezistivitate aparentă înregistrată seamănă foarte mult cu curba laterolog înregistrată cu dispozitivul LL8.

Partea superioară a stratului *A*, notat cu *1*, din fig. VI.4 conţine petrol iar partea inferioară, notată cu *2*, este saturată cu apă sărată. Limita dintre zona cu petrol şi apă sărată este trasată pe diagramă cu o linie dreaptă întreruptă. În dreptul zonei cu apă sărată *2*, toate curbele de rezistivitate aparentă indică valori reduse de ρ_A.

2.3. Determinarea rezistivității reale a zonei spălate

Diagrafiile de proximitate pot fi utilizate la determinarea rezistivității zonei spălate însă valoarea ρ_{PL}, citită pe diagramă în dreptul stratului studiat, trebuie corectată datorită influenței grosimii turtei de noroi. În acest scop se folosește abaca din fig. VI.5.

În ordonată se înscrie valoarea raportului $\frac{\rho_{PL}}{\rho_{tn}}$, de unde se trasează orizontală pînă intersectează curba care indică grosimea turtei de noroi (1 in). Din punctul obținut se coboară verticala și pe abscisă se citește valoarea raportului $\frac{\rho_{xo}}{\rho_{tn}}$. Cunoscînd ρ_{tn}, se află ρ_{xo} corectat pentru influența grosimii turtei de noroi.

Ca și cazul curbelor microlaterolog, pentru grosimi ale turtei de noroi mai mici de 12 mm nu se corectează valoarea ρ_{PL} citită pe diagramă și aceasta reprezintă chiar rezistivitatea zonei spălate ρ_{xo}. Pentru corectarea lui ρ_{PL} sînt necesare următoarele date: ρ_{PL}, ρ_{tn} și h.

2.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafiile înregistrate cu dispozitive de proximitate se folosesc pentru determinarea zonei invadate și a zonei spălate, cînd diametrul invadării este crescut. Se folosesc și pentru determinarea porozității formațiunilor [1].

BIBLIOGRAFIE

1. **Realizări noi în diagrafia sondelor de țiței și gaze I.D.T.** 1965, p. 20.
2. **Loganalysis Handbook P.G.A.C.,** 1966.
3. Doll, H. G., Martin, M. Pixier, M. P. **Review of the progress of Well-loging since the 4-th World Petroleum Congress Proceedings.** Traducere Noutăți în geologie și geofizică nr. 4, 1960.
4. Hamilton, R. G. **Recent advances in loging and interpretation.** World Oil, S.U.A., 154, nr. 5, aprilie 1962, pp. 122—132. Traducere în Noutăți în geologie și geofizică nr. 12 1962.

CAPITOLUL VII

DIAGRAFIA INDUCTIVĂ

Diagrafia inductivă a fost realizată în anul 1946 de către Schlumberger pentru investigarea găurilor de sondă care au fost forate cu fluid pe bază de produse petroliere. Cu timpul a devenit o metodă standard pentru determinarea lui ρ_r și tinde să înlocuiască metodele clasice de rezistivitate.

1. PRINCIPIUL METODEI. DISPOZITIVE ȘI SCHEMA PRINCIPIALĂ DE MĂSURĂ

Se lansează în gaura de sondă un dispozitiv care, în formă simplificată, se compune dintr-o bobină ce emite un cîmp electromagnetic sinusoidal cu o frecvență obișnuită de 20 000 Hz și o bobină receptoare situată la o oarecare distanță de prima, după cum este arătat în fig. VII.1.

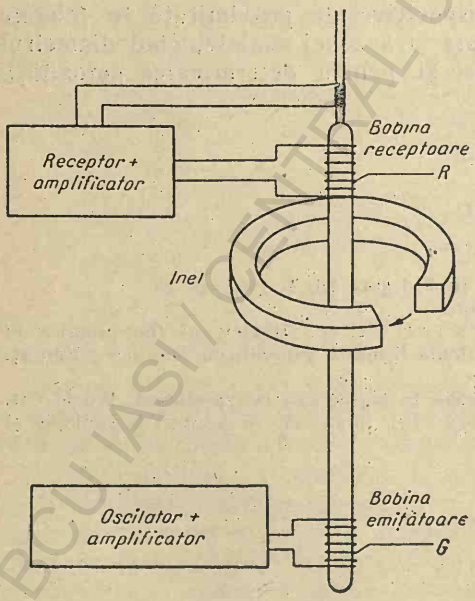


Fig. VII.1. Schema principială a dispozitivului inductiv.

Cîmpul electromagnetic induce în formațiune curenți care circulă sub formă de inele în jurul dispozitivului de măsură. Acești curenți induc la rîndul lor un semnal în bobina receptoare. Acest semnal este proporțional cu conductivitatea formațiunilor, deci invers proporțional cu rezistivitatea. Semnalele dezvoltate în bobina receptoare sînt amplificate și transmise, prin cablu, la suprafață.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dispozitivele inductive conțin, pe lîngă bobinele principale (bobina de transmisie și bobina de recepție), și bobine secundare pentru focalizarea cîmpului electromagnetic sinusoidal. Acestea sînt montate în serie cu bobinele principale. În felul acesta, semnalele care sînt generate de bobinele receptoare auxiliare, ca urmare a acțiunii de inducție din bobina transmițătoare principală, pot la un moment dat să se adauge sau să se scadă din semnalul de bază produs de bobina receptoare principală. În felul acesta se elimină sau se minimalizează influența fluidului de foraj și a straturilor adiacente.

Caracteristicile dispozitivului sînt: lungimea dispozitivului L_{IL}, egală cu distanța dintre bobinele principale de transmisie și recepție; punctul de înregistrare a conductivității aparente 0, situat la jumătatea distanței dintre bobinele principale; față de acest punct se raportează și adîncimile.

Notarea prescurtată a dispozitivelor de inducție se face în funcție de numărul total al bobinelor și de lungime. Astfel un dispozitiv avînd cinci bobine și lungimea $L=27$ picioare se notează 5FF—27. Pînă în prezent se cunosc următoarele dispozitive inductive: 5FF—27, 5FF—40, 6FF—40 și SDI—60. Dispozitivul 5 FF—27 are cea mai mică rază de investigare, deoarece are și cea mai mică lungime, însă puterea de rezoluție este mai mare, în sensul că evidențiază mai bine intercalațiile.

Dispozitivele inductive sînt astfel construite încît permit să se înregistreze simultan următoarele curbe: o curbă de conductivitate, o curbă normal scurtă, o curbă reciprocă și curba potențialului natural (v. fig. VII.2).

Conductivitatea zero corespunde unei rezistivități infinite și se înscrie pe o linie în partea dreaptă a diagramei. Pe măsură ce conductivitățile cresc (rezistivitățile descresc), curba deviază de la dreapta spre strînga (v. fig. VII.2). Scara conductivităților fiind hiperbolică, conductivitățile mari sînt scoase în evidență, iar conductivitățile mici sînt comprimate.

Curba reciprocă este o curbă de rezistivitate înregistrată simultan cu curba de conductivitate prin intermediul unui reciprocator electronic. Această curbă dă aceleași valori măsurate, dar cu o scară liniară de rezistivitate. În felul acesta există posibilitatea să se facă o comparație mai ușoară între diagrafia inductivă și diagrafia electrică obișnuită înregistrată cu un dispozitiv normal scurt sau cu alte diagrafii electrice de rezistivitate.

Dispozitivele construite în scopul efectuării diagrafiilor inductive sînt denumite diferit de firmele constructoare și anume: dispozitive de inducție 5FF—27 (tip D), 6FF—27 (tip G), 5FF—40, 6FF—40 de Schlumberger: Induction Electrolog — de Lane-We ls; Induction Log de Welex, Bridwell și P.G.A.C. În România dispozitivul este denumit inductiv (ILL).

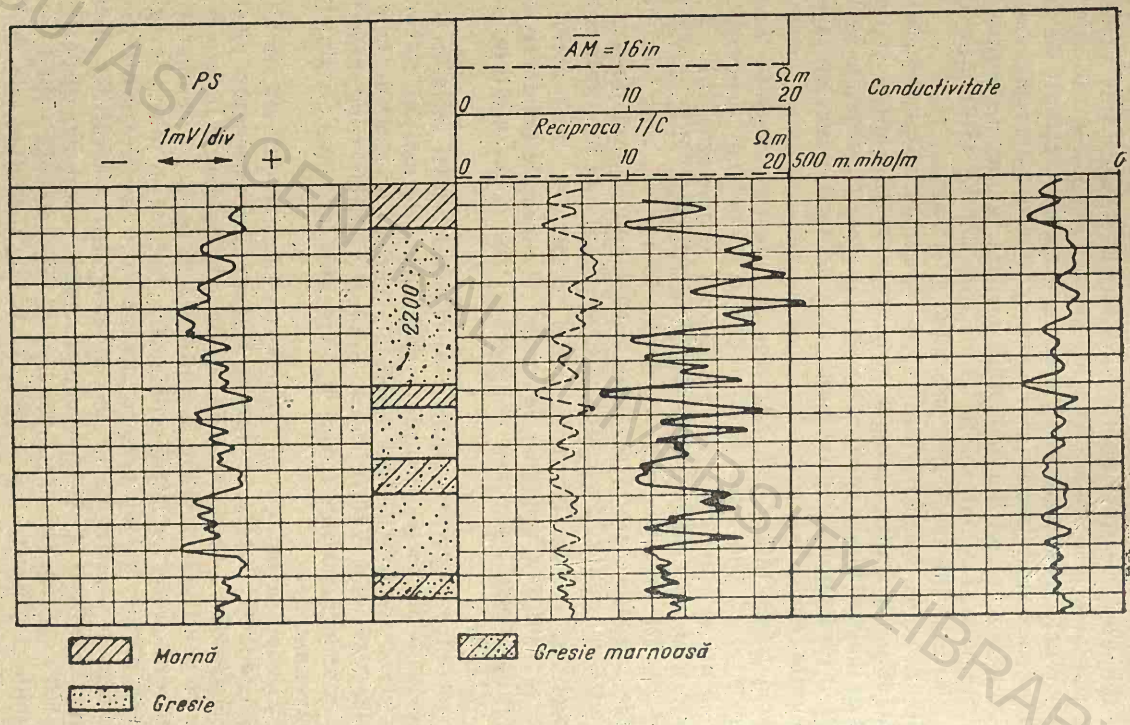


Fig. VII.2. Diagrafie înregistrată cu dispozitiv inductiv SDI-60.

BCU IAȘI - CENTRUL CARTOGRAFIE - LIBRARY

2. SCARA DE ÎNREGISTRARE

Conductivitatea este inversul rezistivității:

1 ohm·m= 1 mho/m;
1 ohm·m=1000 mmho/m;
10 ohm·m= 100 mmho/m;
100 ohm·m= 10 mmho/m;
10000 ohm·m= 1 mmho/m;
∞ ohm·m= 0 mmho/m;

S-a ales ca unitate de măsură pentru conductivitate în investigarea inductivă submultiplul mmho/m al mho/m, deoarece dacă s-ar utiliza ca unitate a conductivității mho/m, atunci toate valorile de rezistivitate mai mare de un ohm·m ar trebui să fie exprimate cu numere zecimale.

3. FACTORII GEOMETRICI ȘI EFECTUL PELICULAR

În investigarea inductivă, intensitatea semnalelor dispozitivului poate fi calculată matematic, presupunînd că mediile implicate în măsurătoare sînt separate prin planuri orizontale (limitele dintre strate) și prin suprafețele cilindrice coaxiale cu dispozitivul de măsură (suprafețele cilindrice coaxiale cu dispozitivul de măsură (suprafețele cilindrice reprezentînd limitele din zona spălată, zona invadată și zona necontaminată). Calculele sînt relativ simple atunci cînd inducția mutuală dintre curenții toroidali (inelari) din formațiune este neglijabilă, respectiv cînd efectul pelicular este redus (skin-efectul). În asemenea cazuri, calculele arată că fiecare mediu implicat în măsurătoare contribuie la mărimea semnalului rezultant, respectiv la conductivitatea aparentă (C_A). Un mediu este caracterizat prin produsul dintre conductivitatea sa și un factor geometric, respectiv de produsul GC. Factorul geometric al unui mediu depinde numai de geometria acestuia: de exemplu, pentru turta de noroi factorul geometric G_{tn} depinde de grosimea turtei, pentru zona invadată factorul geometric G_{zi} depinde de diametrul d_{zi}, pentru noroiul de foraj factorul geometric G_n depinde de diametrul găurii sondei, pentru zona neinvadată factorul geometric G_r depinde de grosimea stratului. Suma factorilor geometrici este egală cu unitatea.

Suma produselor de forma GC reprezintă conductivitatea aparentă. În cazul unui strat avînd turtă de noroi și zonă invadată, conductivitatea aparentă va fi:

$$C_A=C_n\cdot G_n+C_{tn}\cdot G_{tn}+C_{zi}\cdot G_{zi}+C_{ad}\cdot G_{ad}+C_r+G_r, \text{ iar} \quad \text{(VII.3)}$$

$$G_n+G_{tn}+G_{zi}+G_r+G_{ad}=1 \quad \text{(VII.4)}$$

Scriind relația 3 în funcție de rezistivități rezultă:

$$1/\rho_A = G_n/\rho_n + G_{tn}/\rho_{tn} + G_{zi}/\rho_{zi} + G_r/\rho_r + G_{ad}/\rho_{ad}. \quad \text{(VII.5)}$$

Mărimea semnalelor recepționate depinde de extinderea radială a semnalelor emise de bobina de transmisie, respectiv de factorul geometric orizontal, precum și de extinderea pe verticală a acestora, respectiv de factorul geometric vertical.

Factorul geometric orizontal (G_t) sau de extindere radială se poate defini ca reprezentînd factorul geometric al mediului limitat de un cilindru coaxial cu dispozitivul de măsură cînd raza acestuia crește de la zero la infinit. În fig. VII.3 este prezentată variația factorului geometric orizontal în direcție radială pentru dispozitivul 6FF—27. Din această figură rezultă că influența noroiului este redusă (porțiunea de sub curbă notată cu *n*), iar influența turtei de noroi este inexistentă.

Pentru această caracteristică orizontală, presupunînd că cilindrul este infinit de lung, respectiv că stratul are grosimea infinită (influența stratelor adiacente este zero — $G_{ad}=0$) atunci relația VII.5 devine:

$$1/\rho_A = G_n/\rho_n + G_{zi}/\rho_{zi} + G_r/\rho_r \quad \text{(VII.6)}$$

Din relația 6 rezultă că factorul geometric orizontal este influențat de gaura de sondă plină cu noroi, de zona invadată și de zona necontaminată (prima influențează mai puțin).

În fig. VII.4 se prezintă curbele caracteristice pentru factorul geometric orizontal al dispozitivelor 6FF—27, 5FF—40 și 6FF—40. Pentru dispozitivul inductiv 6FF—40, semnalul provenind în majoritatea cazurilor de la o distanță mai mare de 5*d*, respectiv de la o distanță de peste 1 m, se elimină în majoritatea cazurilor influența zonei invadate deci $G_{zi}C_{zi}=0$. Dacă stratul este suficient de gros ($h>2$ m) se obține direct conductivitatea reală (C_r), respectiv rezistivitatea ρ_r pe curba reciprocă înregistrată.

Factorul geometric vertical sau de extindere pe verticală a unui strat orizontal reprezintă influența geometriei stratelor adiacente în funcție de geometria stratului studiat pe verticală (respectiv grosimea acestuia). În fig. VII.5 sînt prezentate două curbe caracteristice ale factorului geometric vertical pentru două strate de grosimi diferite — dispozitivul utilizat fiind 6FF—27. Din analiza celor două curbe caracteristice se constată că pentru o grosime a stratului mai mare de două ori lungimea dispozitivului 1,36 m (54 in), influențele geometriei stratelor adiacente și a geometriei stratului studiat sînt reduse. Pentru stratele a căror grosime este mai mică decît două lungimi ale dispozitivului (respectiv 1,36 m în cazul dispozitivului 6FF—27) se reduce grosimea acestora cu atît mai mult cu cît sînt mai subțiri.

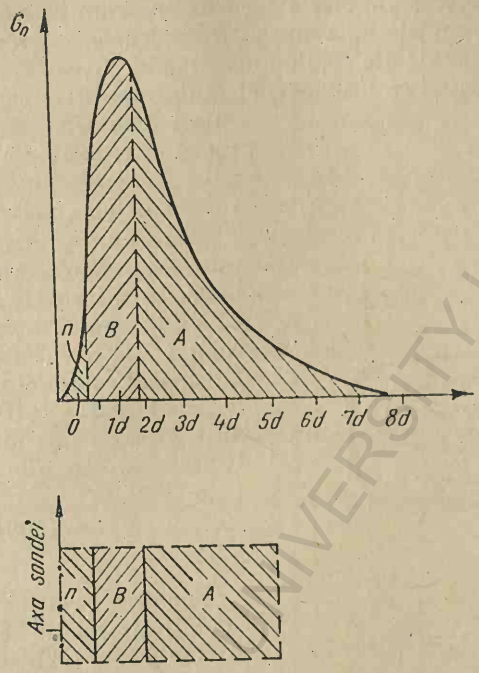


Fig. VII.3. Factorul geometric orizontal.

n — factorul geometric datorat noroiului de foraj; B — factorul geometric datorat zonei invadate; A — factorul geometric detorat rezistivității reale [4].

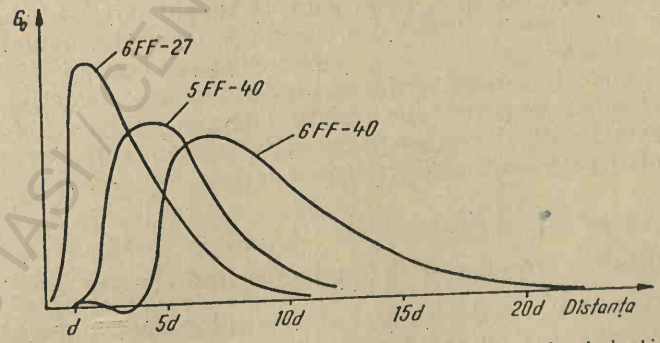


Fig. VII.4. Factorul geometric orizontal pentru dispozitivele inductive 6FF-27, 5FF-40 și 6FF-40 [4].

BCU IAȘI / CENTRUL UNIVERSITY LIBRARY

Efectul pelicular (skin-efect) face ca în anumite condiții din gaura de sondă, rezistivitățile aparente citite pe curbele înregistrate să difere de rezistivitățile reale ale rocilor investigate. Această funcționare anormală a dispozitivului ca urmare a efectului pelicular este rezultatul aceluiași fenomen datorită căruia curenții alternativi de înaltă frecvență curg numai în apropierea suprafeței conductorilor metalici.

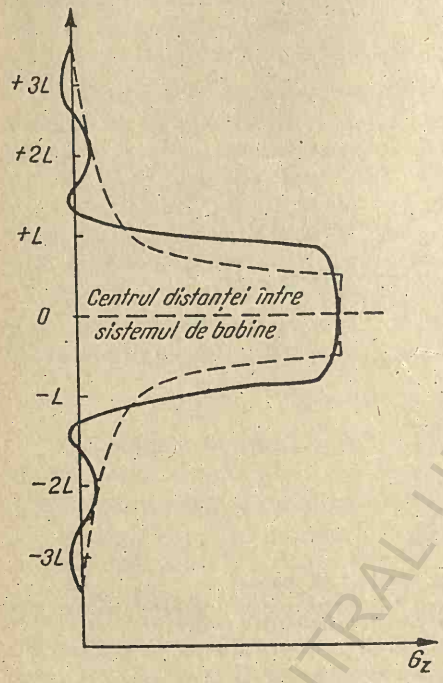


Fig. VII.5. Factorul geometric vertical pentru dispozitivul 6FF-27 [4].

Consecința efectului pelicular este diminuarea cîmpului electromagnetic alternativ cu atît mai mult cu cît noroiul este mai conductiv. Cu relația VII.7 se calculează distanța la capătul căreia cîmpul electromagnetic alternativ de frecvență (f) (obișnuit 20 kHz) într-un mediu de rezistivitate ρ, se diminuează cu 2/3:

$$r = 500\sqrt{\frac{\rho}{f}} \qquad \text{(VII.7)}$$

Conform relației VII.7 rezultă că într-un mediu cu rezistivitate foarte scăzută semnalele vor suferi o reducere apreciabilă și în consecință va fi necesară o corecție.

La dispozitivele de inducție 6FF-40 și SDI-60, corecția influenței efectului pelicular se face automat, în timpul înregistrării. Totuși, aceasta se face între anumite limite determinate de rezistivitățile stratelor. Investigările corecte se fac pentru valori de conductivitate mai mari de 10 mmho/m (valori de rezistivitate mai mici de 100 ohm.m). Peste această limită, investigarea inductivă are un caracter orientativ și nu se utilizează pentru determinarea lui ρ_r.

4. INTERPRETAREA CALITATIVĂ

4.1. Definirea stratelor și determinarea limitelor lor

Datorită focalizării fasciculului de curent, curbele înregistrate cu dispozitive inductive nu arată practic deformări false în fața stratelor subțiri. În această privință, dispozitivele inductive au un avantaj incon-

testabil față de dispozitivele utilizate în investigarea electrică obișnuită și îndeosebi față de dispozitivele potențiale și gradiente cu lungime mare.

La un strat a cărui grosime este mai mare de 2 m, amplitudinea anomaliei atinge obișnuit valoarea maximă, însă pentru strate conductive reprezintă limita inferioară a rezistivității, iar pentru strate rezistive limita superioară a rezistivității. Ca urmare, limita inferioară sau superioară a unui strat rezistiv se obține în punctul de pe flancul anomaliei în care valoarea conductivității reprezintă media citirilor conductivității din dreptul stratului conductiv C_1 și din dreptul stratului rezistiv C_2, după cum este indicat în fig. VII.6.

$$C_{citit}=\frac{(C_1+C_2)}{2} \text{ respectiv } \frac{(C_1'+C_2)}{2} \quad \text{(VII.8)}$$

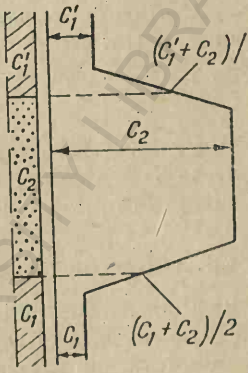


Fig. VII.6. Delimitarea stratului pe diagrafia inductivă
C_1, C_1', — strate conductive; C_2 — strat rezistiv.

4.2. Influența rezistivității noroiului și a diametrului găurii sondei

Pentru stabilirea acestor influențe se presupune un strat foarte gros, fără zonă de invadare, pentru care relația 5 devine:

$$1/\rho_A=G_n/\rho_n+G_r/\rho_r \quad \text{(VII.9)}$$

deoarece G_{ad} și $G_{zi} \to 0$ iar G_{tn} este neglijabil.

Influența diametrului găurii sondei, respectiv a factorului geometric G_n. Toate condițiile fiind identice, creșterea diametrului găurii sondei conduce la creșterea raportului G_n/ρ_n, deci la reducerea rezistivității aparente înregistrate. Pentru un diametru pînă la 0,3 m (12 in) influența diametrului găurii sondei este neglijabilă.

— *Influența noroiului* ρ_n *cînd rezistivitatea acestuia scade.* Toate condițiile rămînînd identice, reducerea rezistivității noroiului conduce la creșterea raportului G_n/ρ_n, deci la reducerea lui ρ_A. Pentru înregistrările efectuate cu dispozitive de inducție 5FF-40, 6FF-40 și SDI-60, influența noroiului de foraj este neglijabilă, dacă rezistivitatea acestuia este mai mare de 0,5 ohm.m, iar diametrul găurii sondei este mai mic de 0,3 m (12 in).

— *Influența noroiului* cînd $\rho_n \to 0$ (cazul noroaielor sărate). Cînd $\rho_n \to 0$ raportul $G_n/\rho_n \to \infty$ și atunci relația VII.9 devine:

$$1/\rho_A \to \infty \text{ deci } \rho_A \to 0 \qquad \text{(VII.10)}$$

Ca urmare, diagrafiile inductive nu se recomandă pentru noroaie a căror rezistivitate este mai mică de 0,5 ohm.m.

— *Influența noroiului cînd* $\rho_n \to \infty$ (cazul noroaielor pe bază de produse petroliere și a sondelor săpate uscat). Cînd $\rho_n \to \infty$ raportul $G_n/\rho_n \to 0$ și atunci relația VII.9 devine:

$$1/\rho_A = G_r/\rho_r \qquad \text{(VII.11)}$$

Din relația 11 rezultă că pentru un strat suficient de gros $\rho_A \approx \rho_r$, deoarece G_r pentru un strat gros $\to 1$. În concluzie, cu cît crește rezistivitatea noroiului, cu atît ρ_A se apropie de ρ_r.

4.3. Influența rezistivității stratului

Plecînd de la relația VII.9 simplificată se observă că dacă toate condițiile rămîn aceleași, crescînd ρ_r scade valoarea raportului G_r/ρ_r și în consecință, cu atît va fi mai mare efectul relativ al coloanei de noroi asupra mărimii semnalului de conductivitate înregistrat. Datorită acestui fapt, diagrafiile inductive nu se recomandă să fie utilizate la investigarea formațiunilor cu rezistivitate mai mare de 100 ohm.m.

4.4. Influența stratelor adiacente și a grosimii stratului

Valorile de conductivitate a stratelor în investigarea cu dispozitive inductive sînt mult mai puțin influențate de prezența formațiunilor adiacente decît în cazul dispozitivelor utilizate în investigarea electrică obișnuită.

Ca o regulă cu caracter general, valorile de conductivitate sînt influențate de ρ_{ad} cînd grosimea stratului este mai mică decît două lungimi ale dispozitivului inductiv.

Influența stratelor adiacente se poate considera neglijabilă dacă raportul $\rho_A/\rho_{ad} < 10$ și dacă stratul este mai gros de două ori lungimea dispozitivului. Pentru valori mai mari decît 10 ale raportului ρ_A/ρ_{ad} sînt necesare corecții pentru obținerea lui ρ_r însă nu și pentru strate a căror grosime este mai mare de 6 m.

Influența stratelor adiacente se neglijează cînd rezistivitatea lor este mai mare decît rezistivitatea stratului.

Corectarea valorilor de rezistivitate aparentă citite pe curba reciprocă $\left(\frac{1}{c}\right)$, datorită influenței stratelor adiacente și a grosimii stratului

studiat, se realizează cu abace care sînt proprii tipului de dispozitiv folosit în măsurătoare.

În fig. VII.7 sînt redate o serie de abace cu care se face corectarea valorilor de rezistivitate aparentă citite pe curba reciprocă, datorită

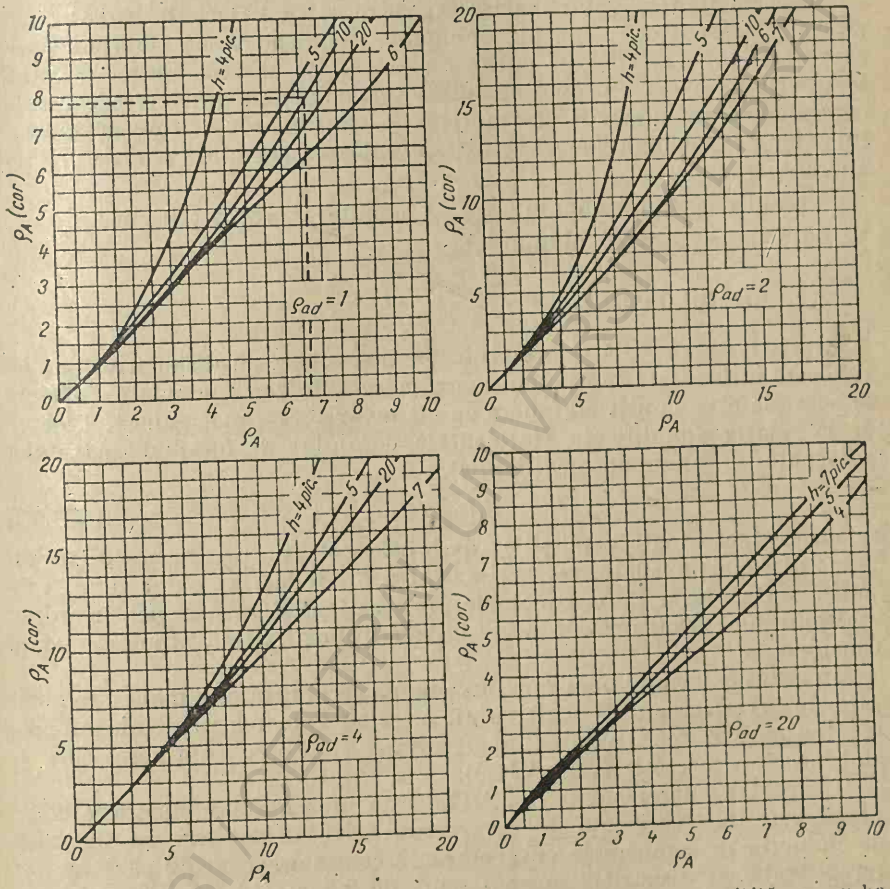


Fig. VII.7. Abace pentru corectarea rezistivităților aparente (ρ_A) citită pe curba reciprocă, determinată de influența grosimii stratului (h) și rezistivității stratelor adiacente ρ_{ad}. Dispozitiv SDI-60.

influenței grosimii stratului și rezistivității stratelor adiacente pentru dispozitivul SDI—60. Din analiza abacelor din fig. VII.7 se constată că pentru stratele subțiri corecțiile au valori importante.

Datele necesare pentru utilizarea abacelor din fig. 7 sînt: ρ_A — rezistivitatea aparentă a stratului, citită pe curba reciprocă; h — grosimea stratului; ρ_{ad} — rezistivitatea aparentă citită pe curba reciprocă a unui strat adiacent a cărei grosime să fie mai mare de 1,5 m (5 pic.).

Abacele din fig. 7 sînt construite pentru patru valori ale rezistivității stratelor adiacente: 1, 2, 4 și 20 ohm.m. Se alege abaca corespunzătoare valorii lui ρ_{ad} citit pe curba reciprocă. Pe abscisa abacei selectate se înscrie valoarea ρ_A, apoi se ridică verticala pînă intersectează curba corespunzătoare grosimii stratului și în continuare se trasează orizontala, iar pe ordonata abacei se citește valoarea corectată a rezistivității aparente ($\rho_{A\,cor}$).

Exemplu ρ_A=6,7 ohm.m; ρ_{ad}=1 ohm.m; h=3 m (10 pic.)

Soluția: $\rho_{A\,cor}$=7,8 ohm.m

4.5. Efectul invaziei

Rezistivitatea reală a formațiunilor investigate cu dispozitive inductive este influențată în cea mai mare măsură de zona invadată; influența acesteia este cu atît mai mare cu cît invazia este mai adîncă. Plecînd de la relația simplificată (influențele noroiului de foraj și a stratelor adiacente se presupun neglijabile),

$$1/\rho_A = G_r/\rho_r + G_{zi}/\rho_{zi} \qquad \text{(VII.12)}$$

se observă că, toate condițiile rămînînd aceleași, pentru un diametru redus al zonei invadate, respectiv pentru G_{zi} redus, valoarea lui ρ_A este puțin influențată. Ca o concluzie, în cazul cînd raza zonei invadate este mai mică decît raza de investigare a dispozitivului, atunci se poate considera $\rho_A \approx \rho_r$.

În cazul existenței unei zone invadate a cărei rază este mai mare decît raza de investigare a dispozitivului, crescînd valoarea raportului G_{zi}/ρ_{zi} se diminuează rezistivitatea aparentă ρ_A și pentru obținerea lui ρ_r sînt necesare corecții (v. § VII.5)

La partea superioară a fig. VII.8 este prezentată o diagrafie complexă, care ilustrează cum sînt reprezentate stratele acvifere pe diagrafia de inducție în comparație cu reprezentarea aceloraşi strate pe diagrafia înregistrată cu dispozitiv normal scurt de 0,4 m (16 in). Pe curba reciprocă ($1/C$), valorile de rezistivitate aparentă citite în dreptul stratelor acvifere A, B și C sînt foarte reduse (în jur de 0,5 ohm.m). Valorile de rezistivitate aparentă citite sînt foarte apropiate de rezistivitatea reală a stratelor respective.

Ca o remarcă, trebuie avut în vedere că în cazul stratelor groase cu o porozitate medie, care sînt profund invadate, curba de rezistivitate aparentă înregistrată cu dispozitiv gradient de 18 picioare este mai in-

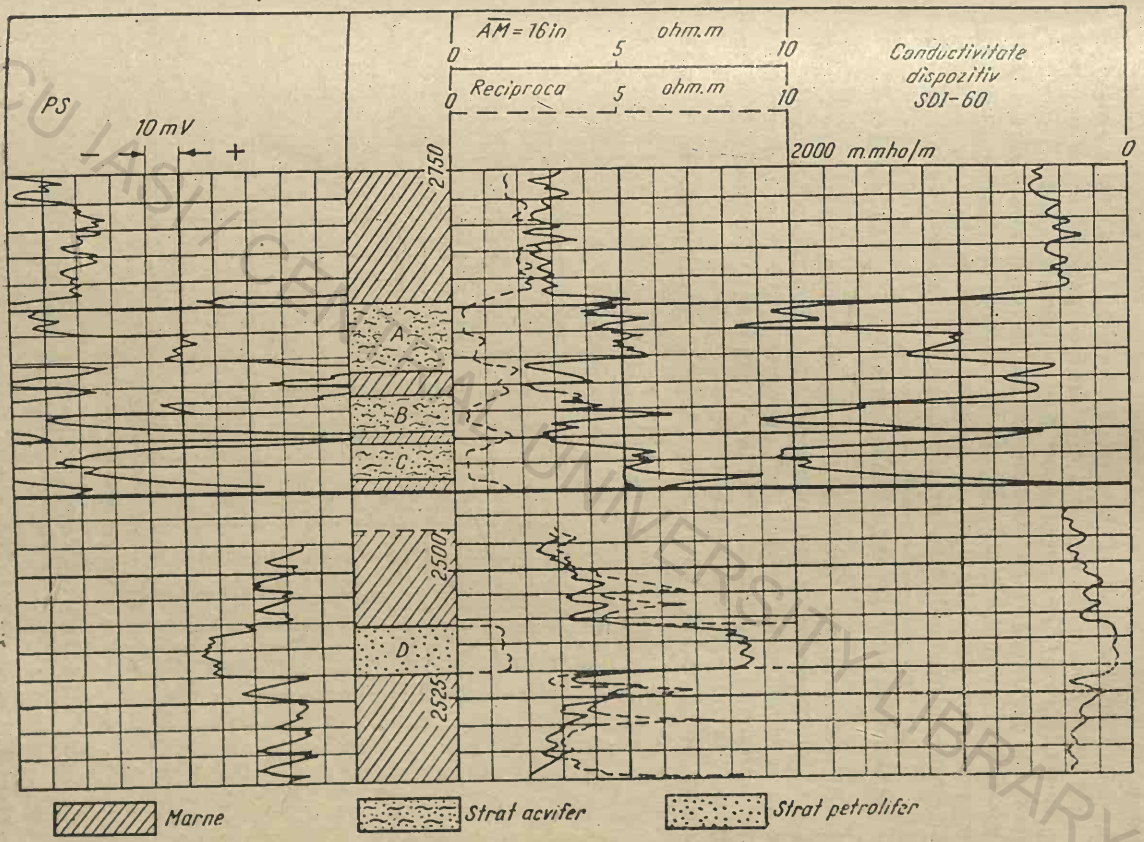


Fig. VII.8. Diagrafii inductive:
A, *B*, *C* — strate cu apă sărată; *D* — strat petrolifer.

dicată decît curba reciprocă ($1/C$) pentru determinarea rezistivității reale a stratelor.

La partea inferioară a fig. 8 este prezentată o diagrafie complexă care ilustrează cum sînt reprezentate stratele petrolifere pe diagrafia de inducție. Stratul D se apreciază a fi saturat cu petrol, deoarece atît pe curba reciprocă ($1/C$) cît și pe curba de rezistivitate înregistrată cu dispozitivul normal scurt ($AM=16$ in) citirile de rezistivitate sînt pentru prima de peste 12 ohm·m, pentru a doua 8 ohm·m, iar curba potențialului natural indică că stratul menționat este poros și permeabil.

5. DETERMINAREA REZISTIVITĂȚII REALE ȘI A SATURAȚIEI

Pentru determinarea *rezistivității reale* se recomandă să se aleagă strate a căror grosime este mai mare de 2 m, deoarece pentru astfel de strate nu se corectează rezistivitatea aparentă citită pe curba reciprocă datorită influenței stratelor adiacente și a grosimii stratului, dacă raportul ρ_A/ρ_{ad} nu este mai mare de 10.

Rezistivitatea reală citită pe curba reciprocă se calculează cu formula

$$\rho_{IL\,cor}=G_{zi}\rho_{xo}+(1-G_{zi})\cdot\rho_r \qquad \text{(VII.13)}$$

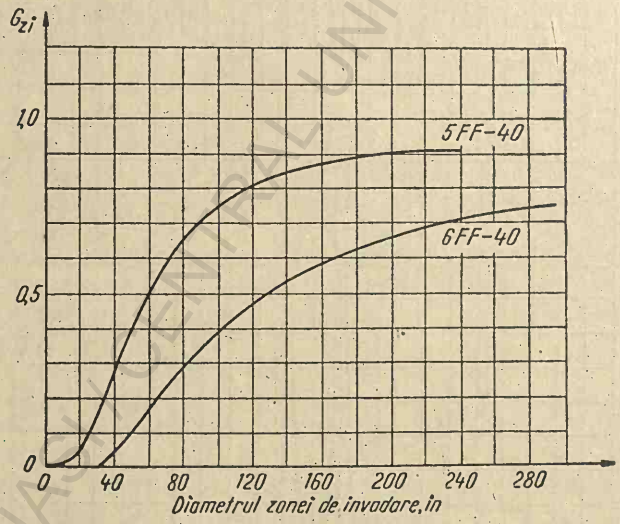


Fig. VII.9. Factorul geometric integrat G_{zi}. Înregistrare cu dispozitive de inducție 5FF-40 și 6FF-40.

G_{zi} (factorul geometric integrat datorită zonei invadate) se determină cu ajutorul abacelor, care sînt construite pentru fiecare tip de dispozi-

tiv. În fig. VII.9 sînt prezentate curbele factorului geometric integrat (G_{zi}) pentru dispozitivele de inducție 5FF-40 și 6FF-40. Pentru determinarea factorului geometric G_{zi} este necesar să se cunoască diametrul zonei invadate. În tabelul 2 sînt date diametrele zonelor invadate în funcție de porozitate.

Cînd diametrul zonei invadate este mai mare decît raza de investigare a dispozitivului, pentru determinarea rezistivității reale a strate-

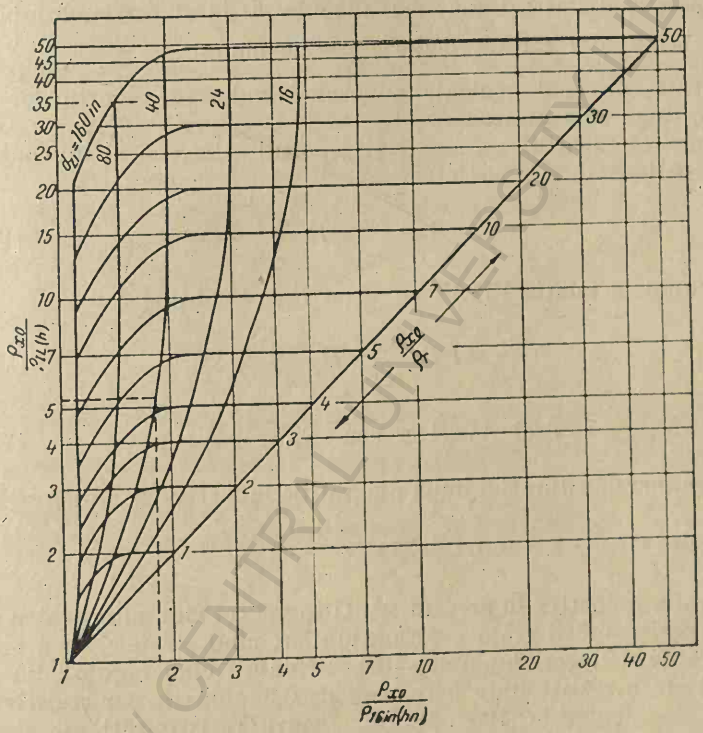


Fig. VII.10. Abacă pentru corectarea rezistivității aparente ρ_A citită pe curba reciprocă, determinată de influența diametrului zonei de invadare. Înregistrare cu dispozitiv SDI-60.

lor se utilizează abace care se construiesc pentru fiecare tip de dispozitiv. În fig. VII.10 se prezintă abaca care se utilizează la corectarea rezistivităților aparente citite pe diagrafiile de inducție înregistrate cu dispozitiv SDI-60.

Exemplu de utilizare a abacei. Date: — rezistivitatea aparentă citită pe curba reciprocă (1/*C*) în dreptul unui strat a cărui grosime este mai mare de două ori lungimea dispozitivului $\rho_{IL}=7{,}8$ ohm·m; — rezistivitatea aparentă citită pe curba normal scurtă de 16 in (corectată pentru grosimea stratului și a noroiului de foraj) $\rho_{16(hn)}=23$ ohm·m; — rezistivitatea zonei spălate $\rho_{xo}=42$ ohm·m.

Se calculează rapoartele: $\rho_{xo}/\rho_{IL}=\frac{42}{7.8}=5{,}4$ și $\rho_{xo}/\rho_{16(hn)}=42/23=1{,}8$

Se găsește: diametrul zonei invadate = 40 in și valoarea raportului $\frac{\rho_{xo}}{\rho_r}=5{,}5$, din care se deduce $\rho_r=7{,}6$ ohm.m.

Saturația se poate calcula cunoscînd valoarea raporturilor ρ_{xo}/ρ_r și ρ_f/ρ_w, după cum urmează:

Se notează raportul $\rho_{xo}/\rho_r=A$ și raportul $\rho_f/\rho_w=B$ și în continuare se poate afla saturația astfel:

$$A=\frac{\rho_{xo}}{\rho_r}=F\frac{\rho_f}{\rho_r} \qquad \text{(VII.14)}$$

Înlocuind în relația VII.14 pe ρ_f cu $B\rho_w$ se obține:

$$F\frac{\rho_f}{\rho_r}=FB\frac{\rho_w}{\rho_r}=B\frac{\rho_0}{\rho_r}=BS_w^2, \qquad \text{(VII.15)}$$

deci $A=BS_w^2$ sau $S_w=\sqrt{\frac{A}{B}}$ (VII.16)

Determinarea saturației după diagrafiile inductive se aplică sporadic.

6. DOMENIUL DE APLICABILITATE

Diagrafia inductivă în prezent se utilizează cel mai mult pentru determinarea rezistivității reale a formațiunilor, cînd stratele au o grosime mai mare de două ori lungimea dispozitivului, cînd noroiul din gaura de sondă are o rezistivitate mai mare de 0,5 ohm·m, iar rezistivitatea stratului nu depășește 100 ohm·m. Pentru rezistivități ale stratelor cuprinse între 60—100 ohm·m, precizia determinării lui ρ_r scade, iar pentru rezistivități mai mari nu se recomandă utilizarea diagrafiei inductive.

Dacă înregistrările sînt făcute cu dispozitivul centrat, se elimină efectul găurii de sondă. Totuși, chiar dacă dispozitivul este centrat dar diametrul găurii de sondă este mai mare de 0,3 m (12 in), măsurătorile sînt influențate.

Diagrafiile de inducție sînt puțin influențate de rezistivitatea stratelor adiacente și această influență se neglijează cînd $\rho_A/\rho_{ad}<10$.

Diagrafiile de inducție se pot executa în găuri de sondă cu fluide cu rezistivitate mai mare de 0,5 ohm·m și în sonde săpate uscat.

Dacă rezistivitatea zonei invadate ρ_{xo} este superioară rezistivității reale a stratului, atunci se obțin valori corecte pentru ρ_r. Totuși pentru diametre de invazie mai mari decît raza de investigare a dispozitivului, rezistivitatea aparentă citită pe curba reciprocă ($1/C$) trebuie corectată (pentru dispozitivul 6FF-40 raza de investigare este în jur de 4—5 d iar pentru dispozitivul SDI-60 este de 6—8 d).

Măsurătorile sînt puțin influențate de rezistivitatea fluidului de foraj cînd $\rho_f/\rho_w \geqslant 5$.

Diagrafia inductivă nu se recomandă să fie utilizată în fluide de foraj avînd rezistivitate mai mică de 0,5 ohm·m; totuși dacă rezistivitatea stratelor investigate este scăzută se poate utiliza pînă la rezistivități de 0,2 ohm·m.

Diagrafia inductivă nu se folosește în găuri de sondă tubate. Date suplimentare despre diagrafiile inductive se găsesc în alte lucrări de specialitate [1, 2, 4].

BIBLIOGRAFIE

1. Guyod, H. **The Shielded Electrode Method.** World Oil, decembrie 1951, p. 134.
2. Dumanoir, J. L., Tixier, M. P., și Martin, M. **Interpretation of the Induction-Electrical Log in Fresh Mud,** Journal of Petroleum Technology, vol. 9, nr. 7, iunie 1957.
3. **Loganalysis handbook P.G.A.C.** — 1966.
4. Pirson, J. Sylvain. **Handbook of Well Log Analysis,** 1963.

BCU IASI / CENTRUL UNIVERSITAR

CAPITOLUL VIII

FUNDAMENTAREA FIZICĂ A DIAGRAFIILOR RADIOACTIVE

1. CARACTERISTICILE PRINCIPALE ALE NUCLIZILOR

Atomii elementelor sînt alcătuiți dintr-un nucleu, în care este concentrată aproape toată masa atomului și dintr-un înveliș format din electroni care se învîrtesc în jurul nucleului.

Nucleul atomilor este constituit din protoni și neutroni precum și din alte particule și antiparticule [1, 2, 3].

Protonul este o particulă elementară avînd sarcină electrică pozitivă. În cazul unui atom neutru, sarcina electrică pozitivă a nucleului este egală, în valoare absolută, cu sarcina electrică negativă a ansamblului de electroni.

Numărul protonilor din nucleul unui atom reprezintă numărul de ordine al elementului respectiv din tabelul lui Mendeleev și este notat cu Z^*.

Neutronul este o particulă elementară cu o sarcină electrică foarte redusă. Datorită faptului că are o mare putere de pătrundere, neutronul stă la baza investigărilor radioactive.

Considerînd că masa neutronului este sensibil egală cu a protonului, înseamnă că dacă se cunoaște numărul de masă A^{**} și numărul de ordine al elementului se poate determina numărul de neutroni ai elementului respectiv:

$$N=A-Z \qquad \text{(VIII.1)}$$

În prezent se cunosc peste 1 400 nuclee diferite, din care majoritatea sînt nuclee radioactive obținute pe cale artificială. În natură se cunosc 103 elemente, deci în medie fiecare element are 13 nuclee cu masă atomică diferită. Nucleele cu același număr atomic Z, dar cu număr de masă A

* Z este numărul atomic întreg care exprimă sarcina electrică (pozitivă) a nucleului.

** Numărul de masă A este numărul total de nucleoni (protoni + neutroni) a unui nuclid dat.

diferit, se numesc *izotopi*; nucleele care au același număr de masă A, dar au număr atomic diferit Z se numesc *izobari*; nucleele cu același număr de neutroni, poartă denumirea de *izotoni* (Be_4^9, C_6^{11})

2. RADIOACTIVITATEA

Un nuclid instabil, care se dezintegrează fără intervenția unei cauze exterioare, se numește *radioactiv*. Se cunosc mai multe tipuri de dezintegrări radioactive, care pot fi clasificate în dezintegrări datorită numai nucleului și în dezintegrări la care participă și învelișul electronic al atomului.

Legea dezintegrării cu emisie de particule α este:

$$X_Z^A \rightarrow He_2^4 + X'^{A-4}_{Z-2} \qquad \text{(VIII.2)}$$

Conform acestei legi, nucleul rezultat din dezintegrare aparține unui element deplasat cu două locuri spre începutul tabloului periodic al lui Mendeleev.

Legea dezintegrării cu emisie de particule β^- este:

$$X_Z^A \rightarrow \beta^- + X'^A_{Z+1} \qquad \text{(VIII.3)}$$

Conform acestei legi, nucleul rezultat din dezintegrare aparține unui element deplasat cu un loc spre sfîrșitul tabelului periodic al lui Mendeleev.

Legea dezintegrării cu emisie de particule β^+ este:

$$X_Z^A \rightarrow \beta^+ + X'^A_{Z-1} \qquad \text{(VIII.4)}$$

Conform acestei legi, nucleul rezultat din dezintegrare aparține unui element deplasat cu un loc spre începutul tabelului periodic al lui Mendeleev.

Radiațiile β și α avînd o putere redusă de pătrundere nu sînt utilizate în diagrafiile radioactive.

Radiațiile γ sînt unde electromagnetice de aceeași natură cu razele Röntgen, însă de energie și frecvență mai mare. Energia lor variază în limite foarte largi (de la 2 keV la 7 MeV). Au putere redusă de ionizare. Datorită puterii mari de pătrundere, radiațiile γ sînt utilizate în diagrafiile radioactive.

Legea dezintegrării prin captură K este:

$$X_Z^A + e^- \rightarrow X'^A_{Z-1} \qquad \text{(VIII.5)}$$

În acest caz, captura K este însoțită de o emisie de radiații X, datorită restructurării învelișului electronic. Radiațiile X sînt de natură electromagnetică și avînd o putere mare de pătrundere pot fi utilizate în diagrafiile radioactive.

Captura L nu se foloseşte în diagrafiile radioactive.

3. LEGILE DEZINTEGRĂRII RADIOACTIVE

Dezintegrarea radioactivă este un fenomen statistic, care se poate descrie prin legi, însă nu se poate prevedea momentul în care se va dezintegra un anumit nucleu dintr-un ansamblu de atomi de acelaşi fel, ci numai faptul că din ansamblul de N nuclee de aceeaşi natură, în intervalul de timp dt se va dezintegra, în medie, un număr dat de nuclee dN şi anume:

$$dN = -\lambda N dt \qquad \text{(VIII.6)}$$

în care λ este o constantă.

Constanta λ*, numită *constantă de dezintegrare*, reprezintă probabilitatea de dezintegrare a unui nuclid raportată la unitatea de timp. Semnul minus din relaţia (VIII.6) apare ca urmare a faptului că prin dezintegrare N descreşte.

Prin integrarea relaţiei VIII.6 se obţine:

$$\ln N = -\lambda t + C \qquad \text{(VIII.7)}$$

Valoarea constantei C de integrare se determină considerînd că în momentul t=zero, numărul de nuclizi radioactivi va fi egal cu N_0. Astfel rezultă că:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \text{sau} \quad : N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \text{(VIII.8)}$$

$$\text{Produsul } \lambda N = A^{**} = -\frac{dN}{dt} \qquad \text{(VIII.9)}$$

se numeşte *activitatea radioactivă* sau prescurtat radioactivitatea nuclidului care se dezintegrează. Aceasta reprezintă numărul de atomi care se

---

* Constanta λ depinde de natura nuclidului.

** Unitatea de măsură a activităţii radioactive în sistemul SI şi CGS este s^{-1}. În afara acestor sisteme sînt următoarele unităţi de măsură: curie (Ci), reprezentînd activitatea unui nuclid radioactiv care suferă $3{,}7 \times 10^{10}$ dezintegrări/s; rutherford (Rd) egal cu 10^6 dez/s; eman (em), egal cu 3,7 dez/s$= 10^{-10}$ Ci$= 3{,}7 \cdot 10^6$ Rd; 1 gram echivalent/g rocă, reprezentînd cantitatea totală de elemente radioactive dintr-un gram de rocă care produce o radioactivitate egală cu cea dată de un gram de radiu ($3{,}7 \times 10^{10}$ dez/s); o concentraţie de 1 g radiu echivalent dintr-un g de rocă corespunde cu radioactivitatea de 1 Ci; 1 microgram radiu echivalent pe tona de rocă (μg Ra echivalent/t) reprezintă cantitatea de radiu exprimată în micrograme (10^{-6} Ra) ce produce aceleaşi radiaţii gama ca toate elementele radioactive obţinute într-o tonă de rocă (10^6 g). Această unitate echivalează cu 28 g uraniu sau 5,7 g thoriu la o tonă de rocă; röentgen/oră (γ/oră) se defineşte ca doză de radiaţie gama pentru care în timp de o oră într-un centimetru cub de aer, la 760 mm coloană de mercur şi temperatura de 0°C, se formează $2{,}08 \times 10^9$ perechi de ioni a căror sarcină totală este de 1 UES de fiecare semn.

dezintegrează în unitatea de timp sau, altfel spus, viteza de dezintegrare. Ca urmare a faptului că activitatea radioactivă A este proporțională cu ansamblul nuclizilor N, activitatea unei substanțe radioactive scade cu timpul.

Viața medie a unui nuclid se determină prin relația

$$\tau = \frac{1}{N_0}\int_{N_0}^{0} t\,dN = \frac{1}{N_0}\int_{0}^{\infty} t\lambda N_0 e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda} \qquad \text{(VIII.10)}$$

În investigările radioactive, pentru caracterizarea unei substanțe radioactive se folosește o mărime T legată de constanta de dezintegrare λ și anume timpul necesar ca numărul nucleelor substanței radioactive să scadă la jumătate. Mărimea T este denumită *timp de înjumătățire*.

Timpul de înjumătățire a unei substanțe radioactive se deduce prin înlocuirea lui N din expresia VIII.8 cu $N_0/2$:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \text{ sau } : 2 = e^{\lambda T} \qquad \text{(VIII.11)}$$

Dacă se logaritmează relația 11 se obține:

$$T = \ln\frac{2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} \qquad \text{(VIII.12)}$$

Un nuclid este cu atît mai radioactiv cu cît timpul de înjumătățire respectiv este mai mic.

4. DEZINTEGRĂRI SUCCESIVE

În urma dezintegrării poate apare fie un element stabil (în acest caz este valabilă ecuația 7), fie un element radioactiv sau chiar un lanț întreg de alte dezintegrări, respectiv serii radioactive. În natură, se cunosc trei serii radioactive alcătuite din nuclizi: seria toriului Th_{90}^{232}, seria uraniului U_{92}^{238} și seria actinuraniului U_{92}^{235} ; o a patra serie, alcătuită din nuclizi obținuți în laborator prin intermediul unor reacții nucleare, este numită seria neptunului. În diagrafiile radioactive obișnuit nu se folosesc substanțe radioactive ale căror nuclee prin dezintegrare să devină ele însele radioactive.

5. FLUCTUAȚIILE STATISTICE ALE DEZINTEGRĂRII

Fenomenele de dezintegrare radioactivă sînt de natură statistică și această natură statistică constă în aceea că legile dezintegrării radioactive sînt relații de probabilitate.

În cazul cînd se fac observații asupra dezintegrării unui mic număr de atomi, fluctuațiile statistice pot juca un rol însemnat. Fiecare atom aparținînd unei anumite specii radioactive este caracterizat printr-o anumită constantă de dezintegrare λ. Această constantă de dezintegrare indică probabilitatea ca un atom să se dezintegreze într-un interval anumit de timp, de exemplu, o secundă. Nu se poate afirma însă cu certitudine dacă dintr-un număr mic de atomi se vor dezintegra într-un anumit interval de timp exact atîți atomi cît corespund probabilității, sau un număr ceva mai mare sau ceva mai mic. Acest fapt este în perfectă concordanță cu noțiunea de probabilitate.

La măsurarea efectivă vor fi deci observate, în diferite momente, uneori valori mai mari, alteori valori mai mici. Abaterea relativă medie de la valoarea medie va fi cu atît mai mare pentru fiecare măsurare individuală, sau, altfel spus, fluctuațiile statistice vor fi cu atît mai importante cu cît vor exista mai puțini atomi radioactivi sau cu cît activitatea medie a probei va fi mai mică. Abaterea relativă medie de la valoarea medie va fi cu atît mai mică, adică fluctuațiile statistice vor fi cu atît mai puțin evidențiate, cu cît numărul atomilor radioactivi crește, iar activitatea lor este mai mare [4].

6. REACȚII NUCLEARE

Se numește *reacție nucleară* orice transformare a unui nucleu-țintă provocată de ciocnirea de către o particulă incidentă (particulă-proiectil). Se cunosc trei categorii de reacții nucleare și anume: a) reacții de tipul $X(a, b)Y$; b) reacții de spelație; c) reacții de fisiune (inclusiv reacțiile termoculeare). În investigările radioactive interesează numai reacțiile de tip $X(a, b)Y$; pentru celelalte reacții se recomandă consultarea unor lucrări de specialitate [3, 5, 6].

Reacțiile nucleare de tipul $X(a, b)Y$ se caracterizează prin aceea că nucleul ciocnit X de particula-proiectil a conduce la formarea unui nucleu Y și rezultă o particulă ușoară b.

Reacțiile nucleare de tipul $X(a, b)Y$ se deosebesc între ele după particulele-proiectil, care pot fi: protoni (H_1^1), deuteroni (H_1^2), tritoni (H_1^3), particule α (H_2^4), neutroni (n_0^1) și fotoni (γ). În investigările radioactive nu se folosesc reacțiile în care particulele proiectil sînt protoni (H_1^1) și tritoni (H_1^3).

La rîndul său o reacție nucleară de tipul $X(a, b)Y$ la care se utilizează drept particulă-proiectil una din particulele enumerate mai sus se deosebește în funcție de natura particulei elementare b ce rezultă în urma reacției nucleare care poate fi un proton (H_1^1), un neutron (n_0^1) etc.

Reacții nucleare cu deuteroni (H_1^2). Principalele reacții cu deuteroni sînt (d, n) și (d, p). Dintre reacțiile cu deuteroni, în diagrafiile radioactive se utilizează numai reacțiile de tipul (d,n) pentru obținerea de neutroni monoenergetici în cazul generatorului de neutroni:

$$H_1^3(d,n)\,He_2^4+Q \qquad \text{(VIII.13)}$$

în care Q=17,6 MeV

Reacții nucleare cu particule α. Principalele reacții cu particule α sînt (α, p) și (α, n). În diagrafiile radioactive se folosește numai reacția de tipul (α, n) pentru obținerea surselor de neutroni, conform reacției

$$Be_4^9(\alpha,n)\,C_6^{12}+Q \qquad \text{(VIII.14)}$$

în care Q=5,65 MeV

Sursele de neutroni conțin întotdeauna Be_4^9 și se deosebesc între ele după natura elementului α activ, care poate fi:
Po^{210}(T=138,32 zile), Ra^{226}(T=1590 ani) și Am^{241}(T=490 ani).

Reacții cu neutroni. Neutronul este o particulă instabilă care se dezintegrează spontan într-un proton și o particulă β^-, cu timpul de înjumătățire de aproximativ 12 min. Orice neutron care nu se dezintegrează spontan conduce la o reacție nucleară. Reacțiile cu neutroni sînt diferite și aceasta depinde în primul rînd de energia cinetică a acestora. Pînă în prezent nu s-a făcut o clasificare universală recunoscută a neutronilor în funcție de energia cinetică a acestora. Se redă clasificarea enunțată de R. Țițeica [3]: neutroni termici cu energia cinetică E_n pînă la 0,025 eV; neutroni epitermici cu energia cinetică $0{,}025<E_n<100$ eV; neutroni intermediari cu energie cinetică $100<E_n<10^5$ eV; neutroni rapizi cu energie cinetică $E_n>10^5$ eV. Neutronii termici și epitermici sînt denumiți în unele cazuri *lenți*.

Reacțiile cu neutroni sînt de mai multe tipuri și anume: (n,γ), (n, p), (n,α) și (n, 2n). În diagrafiile radioactive interesează numai reacțiile de tipul (n, γ) ca de exemplu:

$$H_1^1(n,\gamma)\,H_1^2+Q \qquad \text{(VIII.15)}$$

în care Q=2,23 MeV
care stă la baza diagrafiilor radioactive neutron-gama. Reacțiile (n,γ) sînt numite *reacții de captură* a neutronilor. Asemenea reacții au loc cu neutroni termici.

Reacțiile cu fotoni de radiații γ sînt de două tipuri (γ, n) și (γ, p). În diagrafiile radioactive interesează numai reacțiile de tipul (γ, n) care stau la baza investigărilor gama-neutron. Reacțiile de tipul (γ, n) au loc în cazul cînd energia radiațiilor γ depășește energia de legătură a neutronului din nucleu.

În diagrafiile radioactive interesează numai interacțiunea radiațiilor gama și neutronilor cu substanța, întrucît atît neutronii cît și radiațiile gama au putere mare de pătrundere.

7.1. Interacțiunea radiațiilor gama cu substanța

În urma interacțiunii radiațiile gama cu substanța are loc atenuarea acestora, care este datorată următoarelor fenomene: efectului fotoelectric, efectului Compton și fenomenului de creare de perechi. În diagrafiile radiactive interesează numai atenuarea prin efect fotoelectric, care stă la baza metodei gama-gama selectiv, și atenuarea prin efect Compton, care stă la baza metodei gama-gama.

Efectul fotoelectric sau împrăștierea Thomson constă, de regulă, în smulgerea unui electron din stratul învecinat cu nucleul atomului respectiv. În acest proces, fotonul incident de radiație gama este absorbit și se obține un fotoelectron care, părăsind atomul, are o energie E_e. Energia fotoelectronului E_e se obține prin diferența dintre energia cuantei gama incidente ($h.\nu$) care a provocat smulgerea electronului și energia de legătură a electronului smuls, E_{leg}:

$$E_e = h \cdot \nu - E_{leg} \qquad \text{(VIII.16)}$$

În majoritatea cazurilor, locul rămas liber pe orbită, prin emisia fotoelectronului de energie E_e, este ocupat de un electron de pe o altă orbită, cu emisia unei radiații electromagnetice, producîndu-se astfel efectul de *fluorescență*.

Absorbția prin efectul fotoelectric este importantă în special pentru radiații gama compuse din fotoni de energie mică, deci pentru radiații gama cu lungime de undă mari și pentru substanțe absorbante cu număr atomic Z mare. Efectul fotoelectric este neglijabil în cazul radiațiilor gama cu energie mai mare de 0,6 MeV (deci cu lungimi de undă mici).

Efectul Compton constă în ciocnirea elastică a unui foton de radiație gama a cărui energie este $h \cdot \gamma$ cu un nucleu de masă m_e, urmată de transferul unei părți din energia fotonului electronului, conform legilor ciocnirilor elastice. Ca urmare a ciocnirii, fotonul de radiație gama este împrăștiat* sub un unghi θ, iar electronul este pus în mișcare (v. fig.

* *Împrăștiere* (*difuzie*) = deviere în diverse direcții a radiației incidente gama de o anumită frecvență (ν) și lungime de undă (λ) cînd se ciocnește cu un electron Compton. Frecvența radiației gama împrăștiate (ν) este mai mică decît a celei incidente. Scăderea frecvenței (ν) este cu atît mai însemnată cu cît unghiul de împrăștiere este mai mare. Variația frecvenței nu depinde de natura substanței pe care cade fasciculul de radiație.

VIII.1). Energia fotonului de radiație gama $h \cdot \nu$ ca urmare a ciocnirii se divide între electronul Compton și fotonul împrăștiat, a cărui energie este mai mică decît cea inițială și egală cu $h \cdot \nu'$ ($\nu' < \nu$). Între energia inițială $h \cdot \nu$, energia fotonului dispersat $h\nu$; masa electronului m_e, viteza fotonului c și unghiul θ există următoarele relații:

$$h \cdot \nu' = \frac{m_e \cdot c^2}{\sqrt{1+\cos\theta}} + \frac{m_e \cdot c^2}{h \cdot \nu} \qquad \text{(VIII.17)}$$

$$E_e = h \cdot \nu \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{h \cdot \nu (1-\cos\theta)}{m_e \cdot c^2}} \right] \qquad \text{(VIII.18)}$$

Coeficientul de atenuare prin efect Compton este același oricare ar fi electronul ciocnit, ceea ce înseamnă că atenuarea prin efectul Compton este proporțională cu numărul de electroni ai atomilor din materialul absorbant, deci cu numărul Z al acestor atomi. Coeficientul de atenuare scade o dată cu creșterea energiei radiațiilor gama, iar atenuarea devine

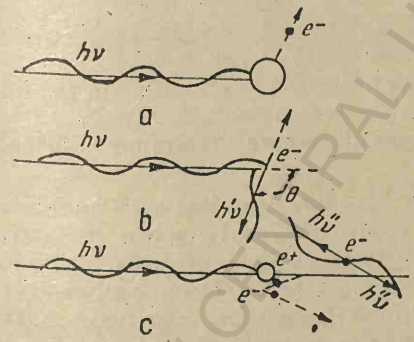


Fig. VIII.1. Reprezentarea schematică a principalelor procese de interacțiune a radiației γ cu materia:
a — efectul fotoelectric; *b* — efectul Compton; *c* — efectul formării de perechi [7].

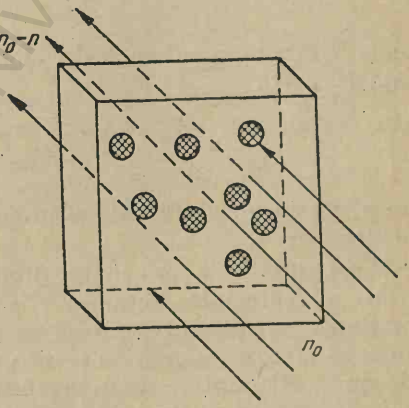


Fig. VIII.2. Schemă ilustrativă pentru definirea secțiunii eficace de interacțiune a neutronilor cu nucleele:
n_0 — numărul de neutroni ce cad pe țintă în unitatea de timp; $n_0 - n =$ numărul de neutroni care au traversat ținta [2].

practic neglijabilă pentru energii mai mari de 1,02 MeV. Împrăștierea prin efect Compton este procesul de atenuare predominant la fotonii de radiații gama cu energii mijlocii (0,6 MeV$< E <$1,02 MeV) [3, 7].

7.2. Interacțiunea neutronilor cu substanța

În diagrafiile radioactive actuale, acest gen de interacțiune se utilizează pe scară largă. Fenomenele cele mai generale de interacțiune dintre neutroni și nucleele substanței sînt: ciocnirile elastice și neelastice.

Secțiunea eficace. Este necesar să se cunoască în linii generale de ce factori depinde probabilitatea unei reacții nucleare de tipul neutron-nucleu. În acest scop să presupunem că nucleele țintei sînt distribuite mai mult sau mai puțin uniform, ca în fig. VIII.2 și sînt bombardate cu un flux de neutroni, iar ținta reprezintă o lamă suficient de subțire, care, practic, nu atenuează fluxul de neutroni. Să presupunem că placa conține N_0 nuclee de o aceeași specie și are suprafața S; în acest caz din cei n_0 neutroni ce cad sub incidență normală, doar n neutroni vor provoca reacția cercetată. După cum e și de așteptat n va fi proporțional cu n_0 și cu numărul de nuclee N_0 ale țintei, care revin unui cm^2. În această situație vom avea:

$$N_0 = \frac{N}{S} \qquad \text{(VIII.19)}$$

unde N este numărul nucleelor ciocnite de neutroni pe unitatea de suprafață (1 cm^2),

sau

$$n = \sigma n_0 N_0 \qquad \text{(VIII.20)}$$

unde σ este un coeficient de proporționalitate care determină numărul neutronilor n.

Coeficientul de proporționalitate σ are dimensiunile unei suprafețe (cm^2) și reprezintă secțiunea eficace pentru procesul nuclear cercetat. Secțiunea eficace σ reprezintă probabilitatea ca un neutron ce străbate ținta să lovească un nucleu și să provoace o reacție. Deci, coeficientul de proporționalitate σ reprezintă probabilitatea de apariție a unei anumite reacții nucleare, probabilitate care se numește *secțiune eficace parțială*. Secțiunea eficace totală de interacțiune a neutronilor cu nucleul este egală cu suma secțiunilor eficace parțiale ale tuturor reacțiilor posibile pentru valorile date ale energiei neutronilor, inclusiv împrăștierea [2].

Secțiunea eficace σ se exprimă în sistemul CGS în unități egale cu 10^{-24} cm^2 care în afara sistemului poartă denumirea de *barn* (uneori se folosește a mia parte dintr-un barn-milibarnul).

Interacțiuni dintre neutroni și nuclee prin ciocnire elastică și neelastică. În ciocnirea elastică energia cinetică a sistemului neutron-nucleu

se conservă. La fiecare ciocnire elastică o parte din energia cinetică a nucleului incident se transmite nucleului țintă, iar neutronul, pierzînd energie, este încetinit. Ciocnirea elastică este similară cu ciocnirea bilelor de biliard și are loc în cîmpul forțelor nucleare; ea este denumită *ciocnire* (împrăștiere) *potențială*.

Ciocnirea elastică poate avea loc și atunci cînd neutronul pătrunde în interiorul nucleului, iar după un timp îl împrăștie, pierzînd o parte din energia sa cinetică, energie care se consumă pentru reculul nucleului. Nucleul care este traversat de neutron este denumit *nucleu intermediar* pe perioada de timp cît acesta conține neutronul care îl traversează.

Ciocnirea elastică de genul descris mai sus poate avea loc cu condiția ca energia neutronului incident să fie astfel încît nucleul intermediar excitat (traversat de neutron) să se găsească într-una din stările sale cuantice sau în imediata vecinătate a uneia din acestea. Acest gen de ciocnire (împrăștiere) elastică se numește *ciocnire elastică de rezonanță*. Prin aceasta se evidențiază faptul că secțiunea de împrăștiere a neutronului are rezonanțe corespunzătoare nivelelor energetice ale nucleului intermediar [2].

La fiecare ciocnire electrică dintre neutron și nucleu, o parte din energia cinetică se transmite nucleului, iar neutronul este încetinit deoarece pierde energie.

Pierderea medie de energie a neutronului a cărui masă este m_n la o singură ciocnire va fi cu atît mai mare cu cît nucleul ciocnit este mai ușor. Din legile de conservare a energiei și impulsului rezultă că în cazul unei ciocniri elastice dintre un neutron de energie E_0 și un nucleu de masă m, pierderea medie (medie aritmetică) de energie ΔE va fi:

$$\Delta E = E_0 \frac{2\, m m_n}{(m+m_n)^2} \qquad \text{(VIII.21)}$$

În cazul diagrafiilor nucleare, de o deosebită importanță este interacțiunea neutronilor cu nucleele atomilor de hidrogen (nuclee ușoare), deoarece, în cazul ciocnirii dintre un nucleu de hidrogen și un neutron, acesta din urmă poate să piardă jumătate din energia sa inițială [2]. Cu cît masa nucleului ciocnit este mai mare, cu atît neutronul incident pierde o cantitate de energie mai mică. Astfel, în cazul ciocnirii unui neutron rapid cu un nucleu de hidrogen acesta pierde în medie 44% din energia sa inițială, iar în cazul ciocnirii cu nucleul unui element greu, ca de exemplu cu U^{235}, neutronul pierde în medie 0,8% din energia sa inițială.

După cum s-a arătat, în urma ciocnirilor elastice ale unui neutron rapid cu diverse nuclee, o dată cu pierderea energiei cinetice are loc și un proces de încetinire a acestuia, însoțit de o micșorare a parcursului său

liber mijlociu (fig. VIII.3). Pe măsura încetinirii unui neutron crește și secțiunea eficace.

Încetinirea și împrăștierea neutronilor la energii apropiate de energia de agitație termică a atomilor din substanță se numește *termizare*. Legile

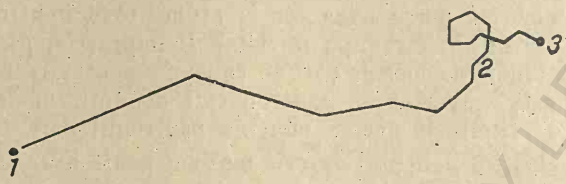


Fig. VIII.3. Schema procesului de încetinire și de împrăștiere a neutronului într-un mediu oarecare:
1 — locul apariției neutronului rapid în moderator (între *1* și *2* are loc încetinirea); între *2* și *3* are loc captarea neutronului termic [2].

termizării neutronilor sînt determinate de structura și de caracteristicile legăturii chimice ale atomilor [7].

În cursul încetinirii sale, neutronul se găsește un anumit timp în echilibru termic cu moleculele moderatorului, luînd parte la agitația haotică generală a moleculelor din substanță. Neutronul aflat într-o asemenea stare se numește *neutron termic*. Energia neutronilor termici este în jur de 0,025 eV [3]. Comportarea neutronilor termici se supune legilor obișnuite de împrăștiere, care continuă în moderator atîta timp cît neutronul nu este capturat de vreun nucleu al acestuia.

Calitatea unui moderator este determinată nu numai de pierderea medie de energie a neutronilor la o ciocnire, ci și de valoarea secțiunii de împrăștiere și de captură, precum și de concentrația nucleelor în moderator.

Se relevă comportarea cadmiului față de neutronii termici; acesta capturează intens neutronii care au energii sub 0,44 eV și este transparent pentru neutronii cu energii mai mari. O placă de cadmiu groasă de 0,75 mm este un filtru perfect pentru neutronii termici (îi absoarbe).

Ciocnirile neelastice se produc în cazul cînd neutronii au energii suficient de mari. Cînd un astfel de neutron se ciocnește cu un nucleu are loc atît o împrăștiere elastică cît și o împrăștiere neelastică. În cazul ciocnirii neelastice, o parte din energia neutronului este cheltuită atît pentru a transmite nucleului energie cinetică, cît și pentru a excita substanța nucleară. În acest caz, nucleul care a produs împrăștierea neelastică a neutronului este în stare excitată. De regulă, nucleul se dezexcită prin emisia unei cuante gama.

Măsurarea radiațiilor nucleare se face pe baza interacțiunii lor cu materia, cu dispozitive numite *traductoare*, prin intermediul cărora efectele radiațiilor sînt transformate obișnuit în semnale electrice care, în ultimă instanță, sînt numărate și exprimate sub forma unei curbe continui (cazul investigărilor nucleare).

Traducătoarele folosite la investigarea găurilor de sondă prin metode radioactive sînt:

— pentru radiații gama:

a) contoare Geiger Müller;

b) traductoare de scintilație pentru acest gen de radiații.

— pentru neutroni:

c) camere proporționale cu adaus de BF_3;

d) traductoare de scintilație pentru acest gen de particule elementare.

8.1. Traductoare pentru radiații gamma

Contorul Geiger-Müller este format dintr-un tub cilindric *1* de sticlă, metalizată la interior. Partea metalizată *3* constituie catodul acestuia. Anodul *2* este un fir metalic central (v. fig. VIII. 4). Obișnuit, contoarele Geiger-Müller sînt alimentate cu un curent continuu cu o tensiune de circa 1 000 V. Datorită diferenței mari de potențial dintre anod și catod, electronii produși de particula incidentă sînt accelerați de cîmpul electric pînă la viteza suficientă pentru ionizarea atomilor gazului. Electronii secundari care iau naștere prin ionizare se accelerează la rîndul lor și ionizează ceilalți atomi ai gazului. În felul acesta, se creează o lavină de electroni care, ajungînd la anod, se neutralizează, producînd în același timp un plus electric. (Fiecare pereche de ioni primari formați în contorul Geiger-Müller poate genera prin amplificare 100 milioane perechi de ioni).

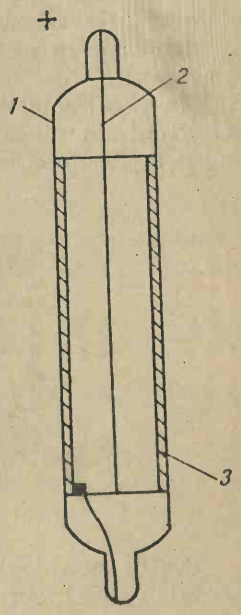


Fig. VIII.4. Contor Geiger Müller: *1* — tub de sticlă; *2* — anod; *3* — catod.

În interiorul contorului (cînd este sub tensiune), intensitatea cîmpului electric crește de la catod spre anod. Datorită acestui fapt, în apropierea anodului electronii secundari se accelerează cel mai mult și pot atinge energii suficiente pentru ionizarea

moleculelor de gaz. În felul acesta, lavina de electroni ia naștere abia în apropierea anodului.

În investigarea radioactivă se folosesc contoare Geiger-Müller cu autostingere avînd un adaus de circa 10% vapori organici poliatomici (pentru reducerea timpului mort), care împiedică emisiunea de electroni prin neutralizarea ionilor pozitivi. În plus, la ciocnirea unei molecule organice cu un foton se produce cu o mai mare probabilitate disocierea moleculei decît emisia de fotoelectroni. Datorită acestui fapt, viața contoarelor G.M. este limitată la 10^3—10^9 impulsuri.

Traductorul de scintilație se compune în principiu dintr-un scintilator (cristal) și un fotomultiplicator (v. fig. VIII.5). Acest gen de traductoare se bazează pe proprietatea anumitor substanțe care, sub acțiunea radiațiilor, produc cuante de lumină (scînteieri) numite *scintilații*. Cînd o radiație incidentă traversează un scintilator, ea interacționează cu atomii sau moleculele substanței scintilatorului și are loc, direct sau indirect, ionizarea și excitarea atomilor sau moleculelor. Electronii care la un moment dat se află în stare de excitare revin la starea normală prin emisia unor cuante de lumină (scintilații), care, ajungînd la un fotomultiplicator, sînt transformate în pulsuri electrice.

Scintilatoarele pot fi construite din substanțe organice sau anorganice și se caracterizează prin: putere de oprire, eficacitate fizică (randamentul transformării energiei absorbite în energie luminoasă), pierdere de lumină prin absorbție și reflexie, spectrul emisiei luminoase și durata scintilației. În diagrafiile radioactive se utilizează numai scintilatoare anorganice.

În cazul scintilatoarelor anorganice, energia de excitație eliberează electroni din rețeaua cristalină, care se îndreaptă spre centrele de activare unde au loc procese de recombinare cu emisiune de fotoni de lumină.

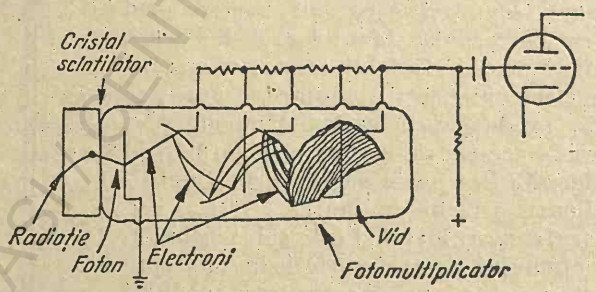


Fig. VIII.5. Contor de scintilație.

Pentru metrologia radiațiilor alfa, beta și gama se utilizează frecvent cristale de NaI, activate cu 1% Tl. La aceste cristale, eficacitatea fizică

este de circa 10%, spectrul emisiei luminoase minim-maxim este de 800—4 500 Å, timpul de scintilație $2-3 \cdot 10^{-7}$. Cristalele sînt transparente pentru radiația proprie și pot fi concrescute la dimensiuni mari pînă la 30×30 cm.

Cristalele de NaI(Tl) sînt foarte indicate pentru detectarea și măsurarea radiațiilor gama, deoarece au densitate mare 3,67 g/cm^3, iar intensitatea de scintilație depinde liniar de energia radiației gama.

Dezavantajele cristalelor de NaI(Tl) constau în primul rînd în aceea că sînt higroscopice (de aceea trebuie capsulate), au coeficient mare de refracție (1,8), iar la temperaturi ridicate randamentul luminos se reduce; scăderea randamentului luminos începe de la temperatura de 50°C, ajungînd ca la 350°C acesta să scadă de circa 5 ori. În cazul investigării găurilor de sondă de mare adîncime prin metode radioactive folosind traductori cu scintilație avînd cristale de NaI(Tl), pentru a se păstra liniaritate între intensitatea de scintilație și energia radiației gama, traductorii sînt montați în interiorul unui dispozitiv refrigerent. În felul acesta se asigură liniaritatea pînă la temperaturi de 150°C, iar pentru dispozitivele moderne pînă la 190°C.

Procesele care se produc într-un traductor de scintilație încep cu absorbția energiei particulei de către scintilator. O parte φ^* din această energie este transformată în fotoni de lumină N_0, iar restul se transformă în căldură. Din energia luminoasă, datorită faptului că aceasta se propagă în toate direcțiile, numai o parte ε ($\varepsilon \leqslant 0{,}7$) ajunge la fotocatodul unui fotomultiplicator; unde eliberează fotoelectroni cu un randament ν cuprins între 0,01 și 0,35. Fotoelectronii astfel eliberați sînt accelerați de prima diodă a F.M., permițînd astfel ca o particulă accelerată să elibereze mai mulți electroni secundari. La prima diodă ajung numai o parte din fotoelectroni, randamentul η fiind cuprins între 0,2 și 1. Electronii secundari trecînd de la o diodă la alta a F.M. sînt multiplicați. Presupunînd că acesta conține n diode, iar factorul de emisiune secundară a diodelor este m ($2<m<5$), la ieșirea din anod se generează Z electroni (un puls de curent):

$$Z = N_0 \varepsilon \nu \eta m^n \qquad \text{(VIII.22)}$$

Fotomultiplicatoarele uzuale au 6—14 diode, tensiuni de alimentare de 700—2 000 V, factori de multiplicare de 10^5-10^9, curenții utili la ieșire de 0,001—1 A, iar timpul de parcurs a electronilor prin F.M. este de $10^{-8}-10^{-9}$ s. Obișnuit, catozii se confecționează din Sb-Cs cu un randament fotoelectronic maxim ν de 0,30 pentru cuante de 4 100 Å.

---

* φ este $\leqslant 20$ și se numește *eficacitate fizică* sau randamentul transformării energiei absorbite în energie luminoasă.

8.2. Traductoare pentru neutroni

Pentru detectarea neutronilor se utilizează procedee de interacțiune ale acestora cu nucleele, respectiv efectele secundare ale interacțiunii neutronilor cu substanța [2].

La baza metodei pentru detectarea neutronilor prin dezintegrarea nucleelor stă reacția:

$$B_5^{10}(n, \alpha)\, Li_3^7 \qquad \text{(VIII.23)}$$

Traductoare pentru neutroni bazate pe ionizarea gazelor. Pentru detectarea neutronilor se introduce în camerele de ionizare B_5^{10} sub forma unui compus gazos, triflorura de bor BF_3, și mai rar sub forma de substanță solidă (carbură de bor, acid boric etc.), cu care se acoperă suprafețele electrozilor. Ca urmare a reacției din relația VIII.23 din interacțiunea neutronului cu borul B_5^{10} rezultă o particulă alfa care ionizează gazul din interiorul camerei sau contorului și se produce astfel un impuls electric, care este amplificat și transmis prin cablu la aparatura de suprafață.

Traductoare pentru neutroni cu scintilație. Scintilatoarele folosite ca traductoare sînt constituite din sulfură de zinc activată cu argint ZnS (Ag), în care s-a introdus B_5^{10}. Traversînd un astfel de scintilator, neutronii termici și epitermici sînt captați cu mare probabilitate de către nucleele de B_5^{10}, rezultînd, conform reacției din relația VIII.23, o particulă alfa și Li_3^7. Particulele α au energie suficientă pentru a atinge granula de ZnS(Ag) și a provoca o scintilație. După cum s-a arătat, lumina scintilațiilor produse ajungînd la fotocatodul unui F.M. creează la anodul acestuia un impuls electric care este transmis prin cablu la aparatura de suprafață.

Dintre traductoarele pentru neutroni, contoarele de scintilație au eficacitate mai mare decît a camerelor de ionizare cu adaus de triflorură de bor, întrucît impulsurile contoarelor cu scintilație au o durată mult mai scurtă și în plus eficacitatea acestora este de 5—6 ori mai mare.

BIBLIOGRAFIE

1. Broda, F. B., Schönfeld, T. **Aplicațiile tehnice ale radioactivității**, București, Editura tehnică, 1959, pp. 17—18, 28.
2. Bak, M. A., Romanov, F. **Neutronul**, București, Editura tehnică, 1963, pp. 22—66.
3. Țițeica, R. **Fizica nucleară. Particule elementare**, Manualul inginerului, vol. I, București, Editura tehnică, 1965, pp. 1982—1986.

4. Onicescu, M. C. **Fluctuații statistice în măsurarea radiațiilor**, București, Editura Academiei, 1958.
5. Malearov, V. V. **Bazele nucleului atomic**, București, Editura tehnică, 1961.
6. Martologu, N., Ciocănel, A. **Metode ale tehnicii experimentale nucleare**, București, Editura tehnică, 1965.
7. Constantinescu, L., Botezatu, R., Calotă, S., Șteflea V., Romanescu, D., Paucă, M., Gohn, E. **Prospecțiuni geofizice**, vol. I, București, Editura tehnică, 1964, pp. 439—441.
8. Frank, E. J. **An airborne counter-controlled detector for radioactive ores.** Radio En. XVI—11, 1956.
9. Petcu, G. I. **Detectori de radiații folosiți în diagrafia radioactivă de cercetare a sondelor petroliere** Rev. Petrol și Gaze nr. 4, București, 1960, pp. 145—152.
10. Sanielevici, A. S. **Radioactivitatea**, București, Editura Academiei R. S. România, 1958.
11. Veiss, H. **Folosirea contoarelor Geiger Müller umplute cu halogeni în cazul debitelor mari de raze gama.** Tehnica nucleară. Aplicații în industrie și agricultură nr. 11, 1965. Traducere, pp. 601—610.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CAPITOLUL IX

DIAGRAFIA RADIOACTIVITĂȚII NATURALE ȘI DIAGRAFIA TRASORILOR RADIOACTIVI

1. DIAGRAFIA RADIOACTIVITĂȚII NATURALE SAU DIAGRAFIA GAMA-NATURAL

Acest gen de diagrafie a fost introdus în anul 1939 de compania Wells Surveys, pentru investigarea găurilor de sondă tubate la care nu se executaseră măsurători geofizice înainte de tubaj. În România primele măsurători în sondă a radioactivității naturale ale rocilor s-au executat în anul 1955.

Radioactivitatea naturală a rocilor (v. § VIII.2) este datorată răspîndirii izotopilor radioactivi naturali în scoarța globului și în special a izotopilor: Th_{90}^{232} (seria thoriului), U_{92}^{238} (seria uraniului), U_{92}^{235} (seria actinouraniului) și K_{19}^{40} [1].

După G. V. Voitkievici, concentrația izotopilor radioactivi naturali scade de la suprafață spre interiorul Pămîntului [2].

Elementele radioactive naturale se găsesc în cantitate mai mare în rocile sedimentare decît în restul rocilor. Dintre toate rocile sedimentare, gipsurile, anhidritele, sarea gemă, sulfurile complexe, sulfurile auro-argintifere și cărbunii minerali au radioactivitatea naturală cea mai scăzută, iar radioactivitatea maximă o au depunerile sedimentare marine: mîlurile cu globigerine și radiolari, argilele roșii și argilele fin dispersate, urmate de sărurile de potasiu.

În scoarța terestră argilele au o răspîndire mare; cum acestea au radioactivitate naturală ridicată, se poate considera că radioactivitatea naturală a rocilor sedimentare depinde de conținutul în argile. O dată cu creșterea conținutului în argile a rocilor scade și permeabilitatea, deci crescînd radioactivitatea naturală scade și permeabilitatea rocilor.

1.1. Principiul metodei, dispozitivul și schema principială de măsură

Diagrafia radioactivității gama naturală se bazează pe studierea rocilor străbătute de găuri de sondă după radioactivitatea lor naturală. În acest scop se lansează în gaura de sondă dispozitivul de măsură care

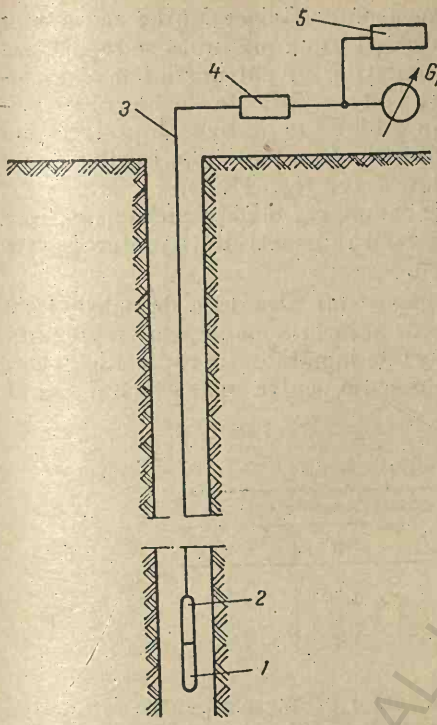


Fig. IX.1. Schema principială de măsură a radiațiilor gama-naturale în sondă:

1 — contor; *2* — bloc de alimentare și amplificare a impulsurilor; *3* — cablu; *4* — bloc de prelucrare; *5* — osciloscop; *Gl* — galvanometru înregistrator.

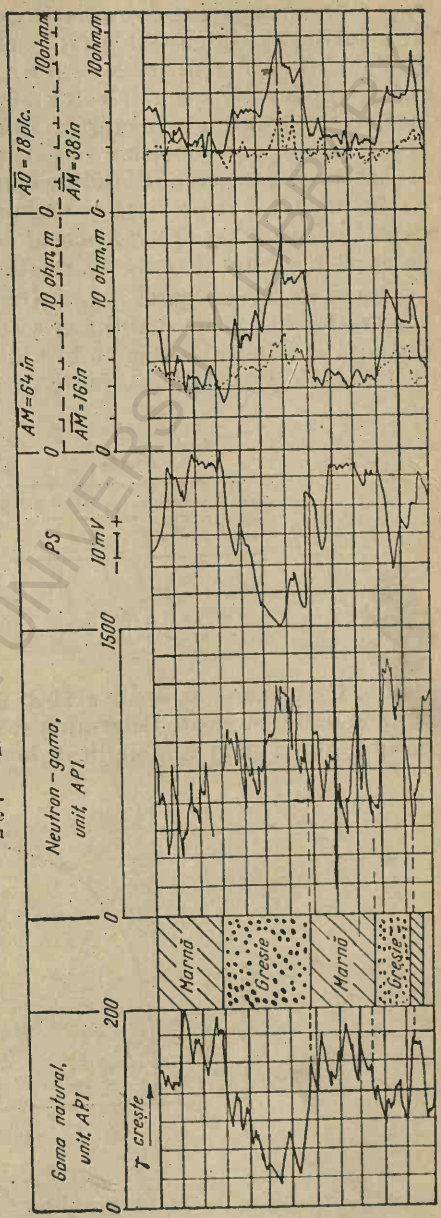


Fig. IX. 2. Diagrafie complexă înrgistrată într-o succesiune de gresii și de marne.

cuprinde un detector de radiații gama (contor Geiger Müller sau contor de scintilație). Intensitatea radioactivității gama măsurată se raportează la punctul mediu al detectorului. Radiațiile γ, pătrunzînd în detectorul *1*, produc impulsuri electrice care sînt amplificate de blocul amplificator *2* și transmise la suprafață prin cablul *3* la un bloc de prelucrare *4* și apoi la un galvanometru înregistrator G_i. Numărul impulsurilor poate fi observat pe ecranul osciloscopului *5* (v. fig. IX.1).

În fig. IX.2 se prezintă o diagrafie complexă, în care curba gama este desenată în partea stîngă. Sensul creșterii radioactivității naturale este de la stînga spre dreapta (γ crește→).

Raza de investigare. Radiațiile gama sînt absorbite de substanțele traversate și se poate defini o grosime de absorbție medie, care reprezintă distanța la sfîrșitul căreia au fost absorbite jumătate din radiațiile gama. În tabelul 3 sînt date grosimile de absorbție pentru apă, calcare, fier și

Tabelul 3

Grosimi de absorbție medii

Energia radiațiilor gama MeV	Grosimea de absorbție medie (cm)			
	Apă	Calcar compact	Fier	Plumb
0,2	5	2,1	0,65	0,14
1,0	10	4,6	1,55	0,86
5,0	23	10	2,8	1,47

plumb. Ca urmare, se poate stabili un factor geometric pentru radiațiile gama și astfel se poate determina raza de investigare a dispozitivului de măsură, după cum este indicat în fig. IX.3.

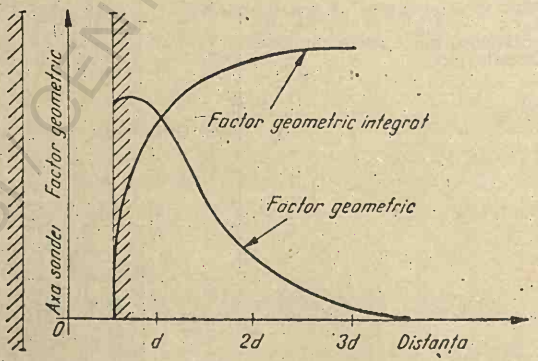


Fig. IX.3. Factorul geometric al dispozitivelor pentru înregistrat radiații gama naturale.

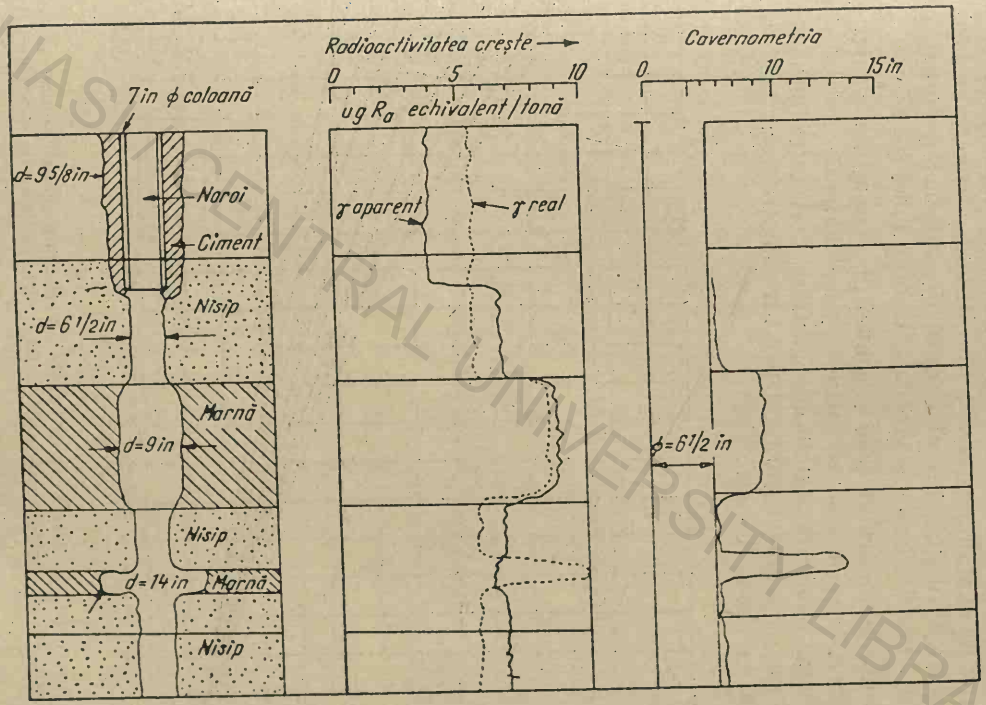


Fig. IX.4. Reprezentarea schematică a influenţei diametrului găurii sondei, noroiului, coloanei de tubaj şi a inelului de ciment asupra curbei gama-natural [3].

BCU IAŞI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

1.2. Interpretarea calitativă

Variațiile amplitudinilor curbelor gama naturale înregistrate nu se datoresc numai radioactivității formațiunilor (conținutului procentual în U, Th și K) ci și influenței noroiului de foraj, diametrului găurii sondei, excentricității dispozitivului, grosimii coloanei de tubaj, grosimi inelului de ciment, precum și grosimii stratului (cînd $h<1{,}5$ m).

Influența diametrului găurii sondei (d). Diametrul găurii sondei influențează înregistrarea radiațiilor gama naturale într-o oarecare măsură, după cum este arătată în fig. IX.4. Corectarea influenței diametrului găurii sondei asupra intensității radiațiilor γ înregistrate se realizează cu abaca din fig. IX.5.

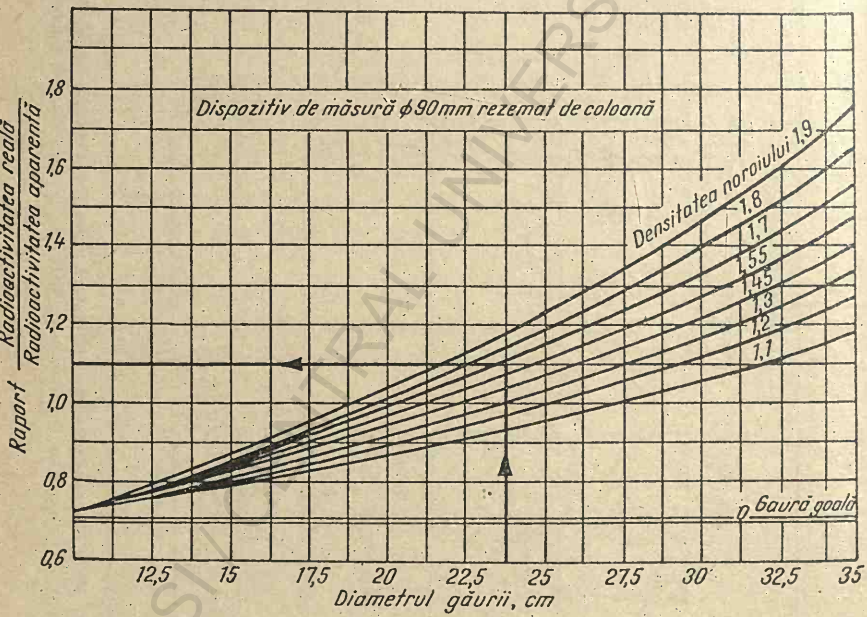


Fig. IX.5. Abacă pentru corectarea influenței diametrului găurii sondei și a densității noroiului de foraj asupra intensității radiațiilor gama înregistrate [3].

Influența noroiului de foraj ρ_n. Rezistivitatea noroiului de foraj nu are nici o influență. Densitatea acestuia are o oarecare influență asupra intensității radiațiilor gama înregistrate, în sensul că pe măsură ce

densitatea noroiului crește, radioactivitatea reală scade. Corectarea acestei influențe se realizează utilizînd abaca din fig. IX.5.

Influența excentricității. Excentricitatea dispozitivului influențează intensitatea radiațiilor gama înregistrate, însă în gaură netubată nu se

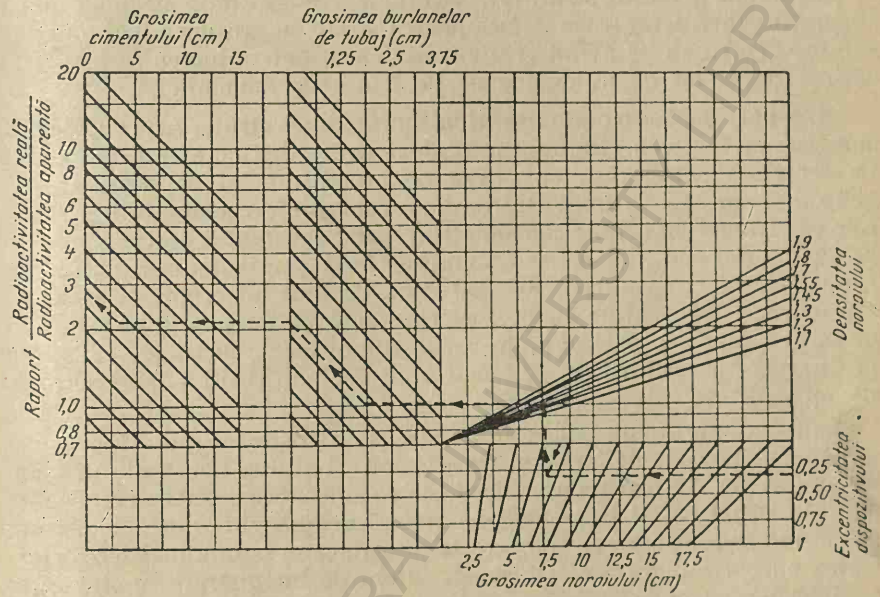


Fig. IX.6. Abacă pentru corectarea influenței excentricității dispozitivului, grosimii burlanelor de tubaj, densității noroiului și grosimii inelului de ciment asupra intensității radiațiilor gama înregistrate [3].

poate corecta această influență. În cazul unei sonde tubate avînd diametrul interior d_c, în care se presupune că dispozitivul de măsură freacă de coloană și are diametrul exterior d_d, influența excentricității este dată de relația

$$\frac{d_c - d_d}{d - d_d} \qquad \text{(IX.1)}$$

Corectarea influenței excentricității asupra intensității radiațiilor gama înregistrate se realizează utilizînd abaca din fig. IX.6.

Influența grosimii coloanei de tubaj. Intensitatea radiațiilor gama înregistrate se reduce odată cu grosimea coloanei. Intensitatea reală a radiațiilor gama naturale se obține utilizînd abaca din fig. IX.6.

Influența grosimii inelului de ciment. Pe măsură ce grosimea inelului de ciment crește, se reduce intensitatea radiațiilor gama înregistrate. Pentru determinarea intensității reale a radiației gama naturale se utilizează abaca din fig. IX.6.

Influența grosimii stratului. Determinarea grosimii stratelor după diagrafii gama natural nu se face pentru strate cu grosimea mai mică de 1,5 m. Pentru strate avînd grosimi mai mari, determinarea se face prin unirea punctelor de inflexiune de pe flancurile anomaliei.

Aspectul curbei gama-natural la limita dintre strate. Aspectul curbei înregistrate la nivelul limitei dintre două strate distincte este influențat de lungimea contorului, de viteza de înregistrare și de constanta de timp a circuitului de înregistrare, după cum este prezentat în fig. IX.7. Curbele trasate cu o linie continuă corespund constantei de timp și vitezei de carotaj care se folosesc obișnuit în formațiunile cu radioactivitate ridicată (2—3 s, respectiv 540—360 m/h). Cu linii întrerupte au fost trasate curbele înregistrate cu aceeași constantă de timp însă cu o viteză de înregistrare de 1 200 m/h. În cazul vitezei mari, curba se deplasează în direcția înregistrării (în sus) mai mult decît în cazul vitezei normale de înregistrare.

Constanta de timp se alege în funcție de intensitatea radiațiilor gama a rocilor traversate de foraje și variază între 1 și 6 s. Constanta de timp trebuie să fie cît mai redusă, deoarece ea introduce o întîrziere în răspunsul dispozitivului și, ca urmare, trebuie redusă viteza de înregistrare pe măsură ce constanta de timp crește, pentru ca să se minimalizeze deformarea curbei înregistrate. Obișnuit, viteza de înregistrare se stabilește considerînd 0,3 m pe constanta de timp. De exemplu, pentru o constantă de timp de 4 s, viteza de înregistrare este $0{,}3 \times 3\,600/4 = 270$ m/h.

Determinarea naturii formațiunilor. Principiile interpretării calitative a formațiunilor sînt reprezentate schematizat în fig. IX.8. Zonele cu radioactivitate ridicată sînt reprezentate prin marne (secțiunile notate cu *A*). Zonele cu radioactivitate scăzută sînt reprezentate prin gresii, nisipuri, calcare, cărbuni etc. (secțiunile notate cu *B*). Marnele și argilele sînt repere și sînt folosite la corelarea diagrafiilor înregistrate în mai multe sonde.

Inflexiunile mici din cuprinsul unei anomalii se pot datora variației procentului de marne sau argile, dar ele pot fi cauzate și de fluctuațiile statistice. Inflexiunile cauzate de fluctuațiile statistice sînt foarte supărătoare și greu de recunoscut pe curbele gama natural, mai ales în regiunile în care contrastele dintre marne și restul stratelor sînt reduse. Pentru a stabili dacă anumite inflexiuni de pe curba gama natural sînt cauzate de fluctuațiile statistice sau de variația procentului de marnă, este necesar a repeta măsurătoarea. Inflexiunile reale se vor repeta, in-

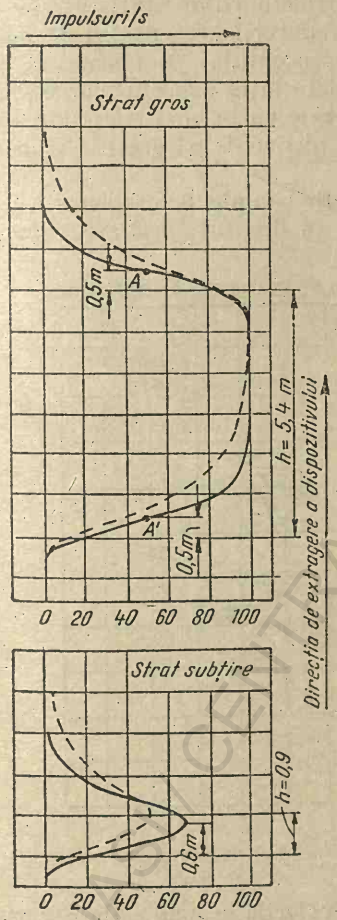


Fig. IX.7. Efectul vitezei de înregistrare asupra curbelor gama [3].

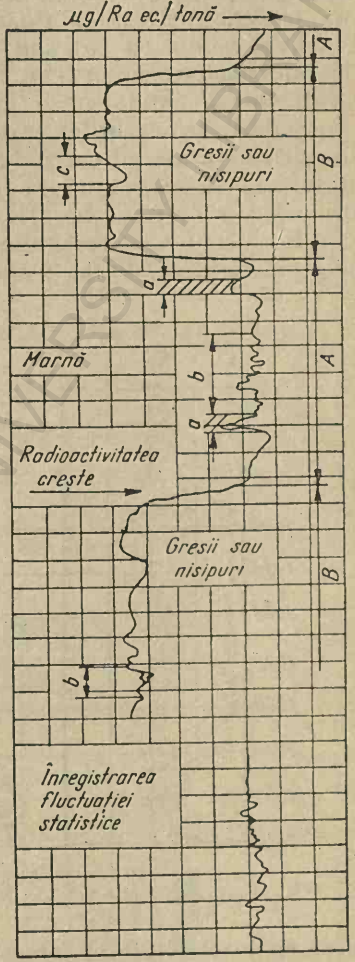


Fig. IX.8. Diagrafie gama-natural schematizată.

BCU CLUJ CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

flexiunile statistice nu. (În cazuri extrem de rare se vor suprapune și fluctuațiile statistice). Cînd nu s-a repetat diagrama radioactivității naturale, fluctuațiile statistice se disting mai greu pe curbă; totuși, comparînd inflexiunile de pe înregistrarea fluctuației statistice (v. curba de la partea inferioară a fig. IX. 8) se poate aprecia că inflexiunile din zonele notate cu „*b*" sînt datorate fluctuațiilor statistice pe cînd inflexiunile notate cu „*a*" sînt datorate reducerii procentului de marnă, iar inflexiunea notată cu „*c*" creșterii procentului de marne.

În majoritatea cazurilor există o corelare între aspectul curbei radioactivității naturale și curba PS, pe ambele curbe marnele fiind reprezentate prin anomalii convexe (→), iar nisipurile și gresiile prin anomalii concave (←) (v. fig. IX.2)

În fig. IX.9 este prezentată o diagrafie complexă înregistrată într-o formațiune saliferă. Curba gama-natural în dreptul sării are valori re-

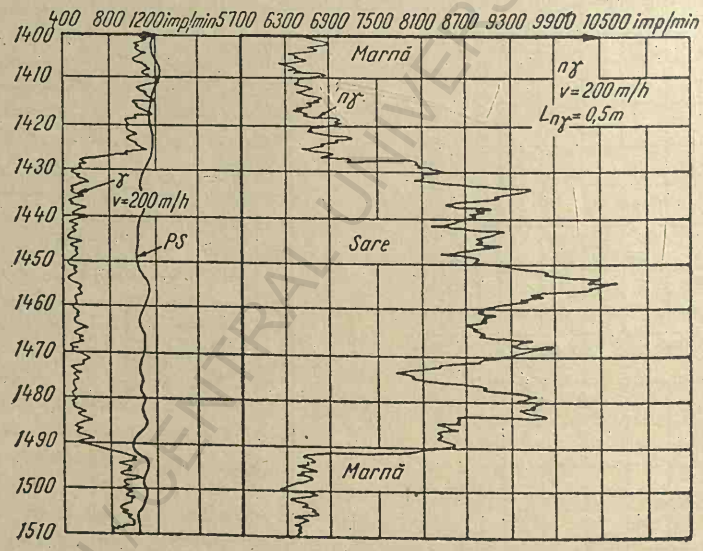


Fig. IX.9. Diagrafii γ și $n\gamma$ înregistrate într-o formațiune saliferă.

duse de radioactivitate în comparație cu valorile crescute ale radioactivității naturale din dreptul marnelor. Noroiul fiind sărat pe profilul PS nu sînt evidențiate limitele stratului cu sare.

În fig. IX. 10 este prezentată o diagrafie complexă înregistrată în dreptul unui strat de cărbuni. Cărbunii minerali se disting pe curbele gama natural prin minime de radioactivitate, iar pe curbele de rezis-

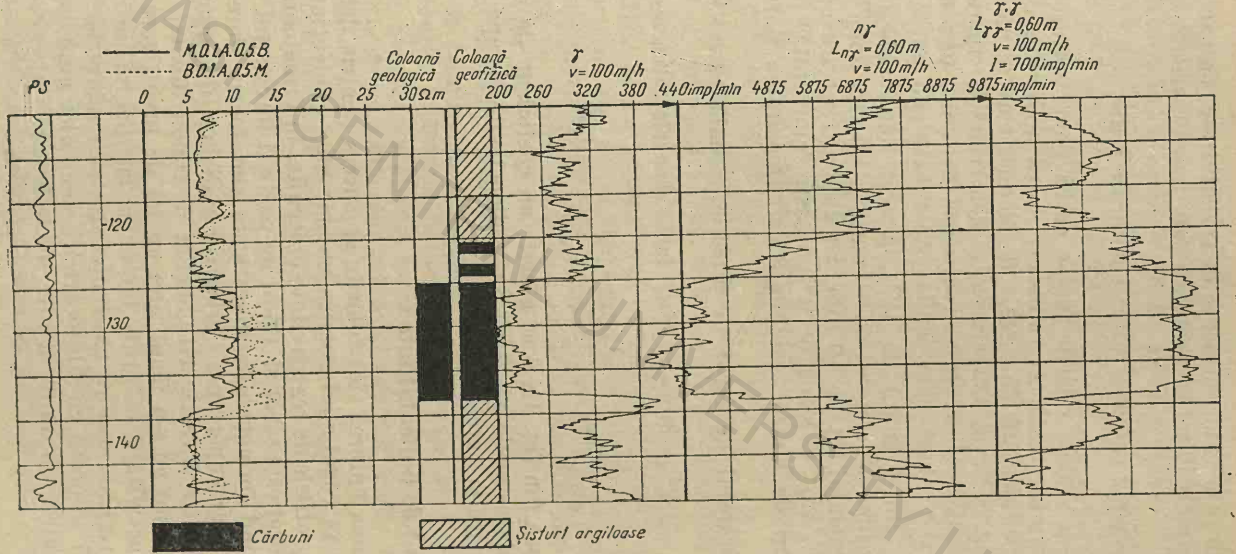


Fig. IX.10. Diagrafie complexă înregistrată într-o formaţiune conţinînd cărbuni minerali.

BCU IAŞI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

tivitate aparentă prin valori crescute de rezistivitate, cu excepția antracitului, la care rezistivitatea aparentă este foarte scăzută.

1.3. Determinarea radioactivității naturale reale

După cum s-a arătat, citirile de pe curba gama natural nu reprezintă radioactivitatea reală, ci radioactivitatea aparentă, deoarece înregistrarea este influențată de o serie de factori, care au fost prezetați schematic în fig. IX. 4. Corectarea radioactivității aparente pentru obținerea radioactivității reale se realizează utilizînd una din abacele din fig. IX. 5 și 6, după cum sonda este tubată sau nu.

Exemplu. Într-o gaură de $12^1/_4$ in sînt două coloane: una de $9^5/_8$ in, cu o grosime a peretelui de 10 mm ($^3/_8$ in) și a doua de 7 in cu o grosime a peretelului tot de 10 mm, iar dispozitivul are un diametru de 85 mm ($3^5/_8$ in). Coloana de $9^5/_8$ in este cimentată în spate și grosimea inelului de ciment este de 3 cm. Densitatea noroiului este 1,3 kg/dm³.

Grosimea noroiului de foraj în direcție radială este:

$$h_n=\frac{1}{2}\,(9^5/_8-2\cdot 2^3/_8-3^5/_8=2^1/_4 \text{ in},$$

iar excentricitatea este:

$$\frac{d_c-d_d}{d-d_d}=\frac{7 \text{ in}-3\,^5/_8 \text{ in}}{12\,^1/_4 \text{ in}-3\,^5/_8 \text{ in}}=0{,}39$$

Utilizînd abaca din fig. IX.6 se găsește un coeficient de corecție de 2,8. Radioactivitatea reală va fi=2,8× radioactivitatea aparentă, care se citește pe diagrafia gama.

1.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafiile gama natural sînt folosite cu succes pentru determinarea zonelor argiloase în cazul cînd acestea nu sînt bine evidențiate pe profilele PS sau pe profilele de rezistivitate obișnuite, în următoarele cazuri: cînd noroiul de foraj este sărat și PS-ul nu poate fi înregistrat (cazul din fig. IX.9) sau cînd formațiunile investigate sînt foarte dure.

Una din cele mai importante aplicații ale diagrafiilor gama natural constă în posibilitatea investigării găurilor de sondă tubate, în special a celor vechi, la care nu s-a făcut nici un fel de investigare electrică. Diagrafiile radioactivității naturale împreună cu diagrafiile neutronice dau informații prețioase asupra existenței stratelor marnoase și a stratelor posibil a fi saturate cu hidrocarburi, mai ales cînd acestea sînt corelate cu rezultatele obținute în alte sonde la care sînt executate diagrafii complexe.

O a doua aplicație importantă a diagrafiei radioactivității naturale constă în utilizarea acesteia la stabilirea adîncimii intervalelor ce urmează să fie perforate în sondele de mare adîncime. La aceste sonde, de o mare importanță este deschiderea stratelor subțiri prin perforare. Tehnica stabilirii cu o precizie de ordinul centimetrilor a adîncimii de perforare are la bază paralelismul care există între profilele PS și profilele radioactivității naturale.

În acest scop se efectuează un profil gama simultan cu diagrafierea mufelor coloanei (dispozitivul utilizat este un locator de mufe). Se corelează diagrafia gama natural și diagrafia mufelor coloanei cu diagrafia electrică, respectiv cu profilul PS pe care este încrisă adîncimea la care urmează a se efectua perforarea. Pe diagrafia mufelor coloanei se înscrie intervalul de perforat în raport cu cea mai apropiată mufă. Se face un al doilea marș cu perforatorul și locatorul de mufe și în felul acesta este posibil a fixa perforatorul exact în dreptul intervalului dorit, bineînțeles făcînd corecția necesară între distanța locator-contor și locator — cel mai jos foc al perforatorului.

Diagrafiile gama natural se utilizează pentr udetectarea cărbunilor, care, nefiind radioactivi, sînt reprezentați pe diagrafia gama prin anomalii cu amplitudini reduse (v. fig. IX. 10).

Diagrafiile gama natural sînt utilizate, de asemenea, pentru detectarea minereurilor de sulfuri complexe, a minereurilor de fier și a minereurilor auro-argintifere, deoarece acestea nefiind radioactive sînt evidențiate pe diagrafiile gama, ca și cărbunii minerali, prin minime de radioactivitate (←).

Diagrafiile gama natural se mai utilizează pentru detectarea zăcămintelor de bauxită și a sărurilor de potasiu. Bauxitele și sărurile de potasiu conțin elemente radioactive naturale și apar reprezentate pe diagrafiile gama natural prin anomalii cu amplitudini maxime, ceea ce le diferențiază de rocile din culcuș și acoperiș care, obișnuit, sînt mai puțin radioactive.

Date suplimentare despre diagrafiile gama se găsesc în bibliografie [3, 4, 5].

2. DIAGRAFIA TRASORILOR RADIOACTIVI

În România, primele operații cu trasori radioactivi în sonde au fost executate în anul 1957.

În industria de petrol, pentru controlul unor lucrări de conducere a sondelor în foraj sau exploatare și pentru rezolvarea unor probleme geologice și hidrogeologice se folosește metoda introducerii în gaura de

sondă a trasorilor radioactivi, sub formă gazoasă, lichidă sau solidă, care emit radiații gama din locul de cantonare sau pe parcurs.

Diagrafia cercetării sondelor cu ajutorul trasorilor radioactivi constă în următoarele: înregistrarea unei curbe gama de referință; injectarea în sonda de cercetare a unui fluid marcat cu izotopi; spălarea găurii de sondă intens în cazul cînd este tubată, în scopul înlăturării fluidului remanent activat; înregistrarea curbei gama de control.

Compararea diagrafiilor de referință și de control poate conduce la concluzii (după distribuția și intensitatea radiațiilor suplimentare care sînt evidențiate pe curba de control) în legătură cu problema geologo-tehnică urmărită. Dispozitivul folosit este același cu care se înregistrează diagrafiile gama-naturale.

Izotopii utilizați pentru cercetare trebuie să permită rezolvarea problemei urmărite, să aibă nocivitate redusă și timp de înjumătățire redus. De asemenea, ionii radioactivi care marchează fluidul să fie adsorbiți în număr cît mai mare de mediul de sondă, astfel încît să rezolve și problema tehnico-geologică urmărită; iar fluidul ajuns la suprafață să conțină un număr redus de nuclizi radioactivi.

Nuclizii radioactivi se împart în patru categorii, după gradul de nocivitate:

Extrem de toxici: $Sn^{90}+Y^{90}$; $Pb^{210}+Bi^{210}$ Ra(D+E); Am^{241}; Po^{210}; Ra^{226}; Ac^{227}; U^{233}; Pu^{239}; Am^{241}; Cm^{242};

Foarte toxici: Ca^{45}; Fe^{59}; Sr^{89}; Y^{91}; $Ru^{106}+Rn^{106}$; I^{131}; $Ba^{140}+La^{140}$; $Ce^{144}+Pr^{144}$; Sm^{151};

Toxicitate moderată: Eu^{154}; Tm^{170}; $Tr^{234}+Pa^{234}$; Na^{24}; P^{32}; S^{35}; K^{42}; Sc^{46}; Sc^{47}; Sc^{48}; V^{48}; Mn^{56}; Fe^{55}; Co^{60}; Ni^{59}; Cu^{64}; Zn^{65}; Ga^{72}; As^{76}; Rb^{86}; $Zr^{95}+Nb^{95}$; Mo^{99}; Tc^{96}; Rh^{105}; $Pd^{103}+Rh^{103}$; Ag^{105}; Ag^{111}; $Cd^{109}+Ag^{109}$; Sn^{113}; Te^{127}; Te^{129}; Cs^{137}; Ba^{137}; La^{140}; Pr^{143}; Pm^{147}; Ho^{166}; Lu^{177}; Ta^{182}; W^{181}; Re^{183}; Ir^{192}; Pt^{191}; Pt^{193}; Au^{196}; Au^{198}; Au^{199}; Tl^{200}; Tl^{202}; Tl^{204}; Pb^{203}.

Toxicitate redusă: H^3; Be^7; C^{14}; F^{18}; Cr^{51}; Ge^{71}; Tl^{201}.

În scopul reducerii nocivității fluidelor de circulație marcate evacuate din gaura de sondă și pentru mărirea eficienței diagrafiei trasorilor radioactivi s-au făcut numeroase studii. În condițiile de investigare din subteran are loc un proces complex de interacțiune între nuclizii radioactivi introduși ca trasori și mediul cercetat (găuri de sondă netubate sau tubate, cimentate sau necimentate în spate, roci cu compoziție diferită, fluide de natură diferită). Acest proces de interacțiune constă, schematic, din următoarele efecte: schimb izotopic între nuclizii radioactivi și atomii unor elemente chimice din compoziția rocilor; adsorbția nuclizilor radioactivi pe particule de rocă sau de ciment existente în spațiul investigat; adsorbție și schimb izotopic între nuclizi radioactivi constituind

trasorul și atomii unor elemente din constituția coloanelor metalice tubate; desorbție-eluție, în cazul în care injectarea trasorului radioactiv în mediul de cercetat este urmată de spălarea abundentă a găurii sondei în vederea eliminării din sondă a reziduurilor radioactive [6].

În tabelul 4 sînt redați izotopii care sînt utilizați curent ca trasori radioactivi pentru rezolvarea unor probleme geologo-tehnice în industria de petrol.

Tabelul 4

Izotopi utilizați ca trasori în industria petrolului

Denumirea nucleului radioactiv	Reacția de producere	Timpul de înjumătățire	Felul energiei	
			beta MeV	gama MeV
Cobalt^{60}	$Co^{59}(n, \gamma)Co^{60}$	5,25 ani	0,306(100 %) 1,48(0,15%)	1,17 (100 %) 1,33 (100 %)
Iod^{131}	$U(n, \gamma)Te^{131}$ $\xrightarrow[24,8\ min]{\beta-} I^{131}$	8,04 zile	0,25 (3 %) 0,36 (9 %) 0,61 (87 %) 0,82 (1 %)	0,08 (2 %) 0,28 (5 %) 0,36 (80 %) 0,64 (9 %) 0,72 (3 %)
Crom^{51}	$Cr^{50}(n, \gamma)Cr^{51}$	27,8 zile	—	0,323 (8 %)
Zinc^{65}	$Zn^{64}(n, \gamma)Zn^{65}$	245 zile	0,325 %	1,11 (45 %)
Zircon^{95}	$Zr^{94}(n, \gamma)Zr^{95}$	75 zile	0,364 (54 %) 0,396 (43 %) 0,883 (3 %)	0,722 (43 %) 0,754 (54 %) Nb^{95}(3 %)

În fig. IX.11 se prezintă aspectul curbelor gama înainte și după injectarea apei marcate în trei sonde de injecție în procesul de recuperare secundară în vederea stabilirii dacă apa injectată pătrunde în stra-

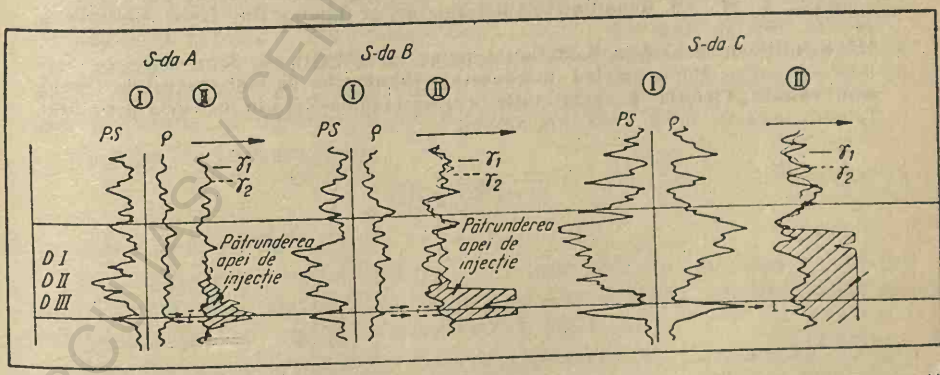


Fig. IX.11. Controlul eficienței procesului recuperării secundare prin injecție cu apă marcată

tul de interes sau şi în alte strate. Studiind aspectul curbelor gama de referinţă şi de control s-a constatat că apa injectată pătrunde şi în stratele adiacente. Concluzia, în cazul prezentat, a fost renunţarea la recuperare secundară prin injecţie cu apă, deoarece apa pătrundea şi în stratele adiacente fisurate.

Diagrafia trasorilor radioactivi se utilizează în prezent la rezolvarea a numeroase probleme tehnico-geologice din care se vor enumera acelea care se folosesc curent.

În sonde netubate: studierea proprietăţilor colectoare ale stratelor; localizarea zonelor de pierdere a fluidului de foraj; determinarea zonelor cu fisuri în roci.

În sonde tubate: controlul nivelului de ciment în spatele coloanelor; controlul cimentării sub presiune; verificarea etanşeităţii dopurilor de ciment; verificarea etanşeităţii pacherelor; determinarea adîncimii şi eficienţei perforaturilor; determinarea comunicaţiei dintre strate; determinarea zonelor neetanşe din spatele coloanei; determinarea circulaţiei fluidelor în spatele coloanei; determinarea spărturilor în coloană; verificarea etanşeităţii coloanelor; determinarea receptivităţii relative a stratelor; controlul operaţiei de acidizare; controlul procesului de recuperare secundară; controlul fisurării hidraulice etc.

BIBLIOGRAFIE

1. Dahnov, V. N. **Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă**, Bucureşti, Editura tehnică, 1961, pp. 61—65.
2. Constantinescu, L. ş. a. **Prospecţiuni geofizice**, Bucureşti, Editura tehnică, 1964, pp. 446—452.
3. Pirson, J. Sylvain. **Handbook of Well Log Analysis**, 1963, pp. 177—185.
4. Scott, I. H. ş.a. **Quantitative Interpretation of Gamma Ray Logs**/ Geophysics, vol. 26, 1961, p. 182.
5. *** **Scintillometer used in Radiation Logging**, World Oil, nr. 3, p. 143.
6. Peteu, Gh. **Studiu privind introducerea schimburilor de ioni produşi de Combinatul chimic „Victoria" în operaţiunile cu trasori radioactivi din industria petrolului.** Tehnica nucleară nr. 2, 1965, pp. 82—90.

CAPITOLUL X

DIAGRAFII NEUTRONICE

Fundamentarea fizico-matematică a diagrafiilor neutronice a fost făcută de B. Pontecorvo încă din anul 1941, însă primele înregistrări s-au efectuat în anul 1949. Ca urmare a aportului prețios adus la elucidarea multiplelor probleme ce intervin la investigarea găurilor de sondă, în special pentru determinarea porozității rocilor carbonatate, diagrafiile neutronice au căpătat o largă răspîndire și diversificare. În țara noastră primele diagrafii neutronice au fost efectuate în anul 1955.

Diagrafiile neutronice cele mai utilizate sînt neutron-gama și neutron-neutron lenți, iar mai puțin utilizate sau în curs de experimentare sînt diagrafia timpului de viață a neutronilor, diagrafia clorului, spectrometria radiațiilor gama de captură sau a radiațiilor gama rezultate în urma ciocnirilor neelastice, diagrafii prin efect Mösbauer și altele.

1. DIAGRAFIA NEUTRON-GAMA

1.1. Principiul metodei, dispozitivul și schema principială de măsură

Pentru obținerea diagrafiilor neutron-gama se bombardează rocile cu neutroni rapizi, 4 MeV$<E_n<$6MeV, care, după un număr de ciocniri, pierzînd energie sînt termizați și captați de nucleele care au aproximativ aceeași masă cu a neutronilor, deci de nucleele atomilor de hidrogen (de unde și denumirea de diagrafia hidrogenului).

Reacția de captură este

$$H_1^1(n,\gamma)H_1^2+Q \qquad (X.1)$$

în care Q=2,23 MeV

Radiațiile gama astfel obținute sînt numărate cu un detector de radiații gama, care poate fi un contor Geiger Müller, sau un contor cu scintilație pentru radiații gama (v. § VIII. 8.1).

Zona în care are loc seria ciocnirilor elastice ale neutronilor cu nucleele atomilor de H pînă la captarea lor se poate reprezenta ca o

sferă cu centrul în sursa de neutroni*. Lîngă sursă, pe direcţiile razei sferei, se găsesc neutroni rapizi, iar spre periferie se află neutroni termici, care fiind captaţi emit radiaţii gama (vezi fig. X.1). Raza sferei poate fi mai mare sau mai mică, după cum numărul atomilor de hidrogen din mediul investigat este mai mic sau mai mare.

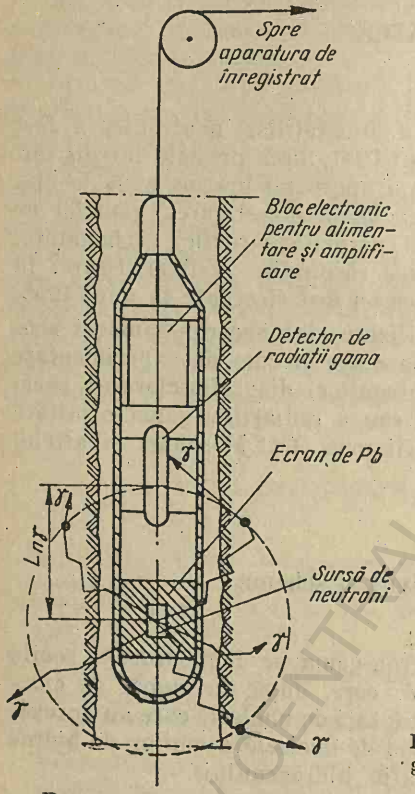


Fig. X.1. Schema dispozitivului neutron-gama şi a distribuţiei neutronilor termici.

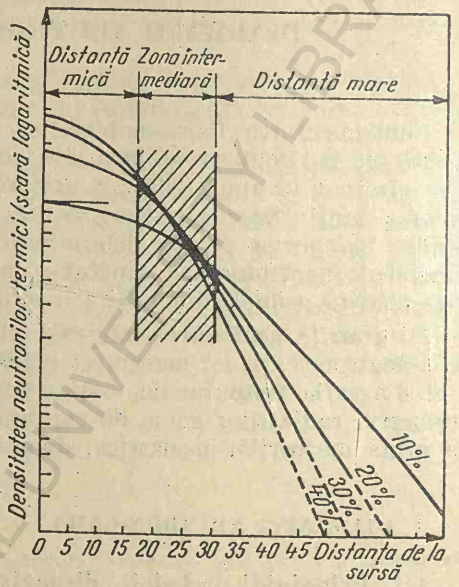


Fig. X.2. Densitatea neutronilor termici în funcţie de distanţa de la sursă.

De mare importanţă este distanţa $L_{n\gamma}$ de la detector la sursa de neutroni. Această distanţă trebuie să fie astfel aleasă încît periferia sferei unde au loc cele mai multe reacţii de captură să fie în dreptul contorului de radiaţii gama, aşa cum este indicat în fig. X.1.

În fig. X.2 se prezintă o serie de curbe care arată distribuţia neutronilor termici în funcţie de distanţa de la sursa de neutroni. Aceste

* Sursa de neutroni poate fi $Po^{210}+Be^{9}$; $Ra^{226}+Be^{9}$; $Am^{241}+Be^{9}$; $Pu^{241}+Be^{9}$; energia neutronilor rapizi emişi de sursă este de 4—6 MeV. Energia neutronilor termici este mai mică de 0,025 eV.

curbe au un caracter orientativ; se poate deduce totuşi că este normal a plasa contorul la o distanţă de peste 40 cm faţă de sursa de neutroni.

Dispozitivul de măsură, prezentat schematic în fig. X.1, se compune dintr-o sursă de neutroni (α+Be), un ecran de Pb pentru radiaţiile γ provenite din dezintegrarea sursei, un detector de radiaţii gama, un bloc electronic pentru alimentarea contorului (sau fotomultiplicatorului) şi pentru amplificarea impulsurilor care sînt trimise la aparatura de suprafaţă unde sînt filtrate, reamplificate, numărate şi înregistrate sub forma unei curbe continue în funcţie de adîncime.

Date despre aparatură se găsesc în alte lucrări de specialitate [2, 3].

Caracteristicile dispozitivului. Lungimea dispozitivului ($L_n\gamma$) reprezintă distanţa între sursă şi mijlocul detectorului; punctul de raportare a măsurătorilor este situat la jumătatea distanţei între detector şi sursă; raza de investigare depinde de lungimea dispozitivului, iar acesta din urmă se alege în funcţie de natura rocilor investigate.

Adîncimea de pătrundere a neutronilor este foarte variabilă, în funcţie de conţinutul în hidrogen, deci în funcţie de porozitate. Raza sferei la periferia căreia se găsesc maximum de neutroni termici variază în general după cum rocile sînt mai mult sau mai puţin saturate cu hidrogen, respectiv după cum sînt mai poroase sau mai puţin poroase:

30% r = 20 cm;
15% r = 30 cm;
5% r = 60 cm.

Reiese că majoritatea reacţiilor de captură au loc în zona invadată şi, cum distanţa sursă-detector este în jur de 40—50 cm, rezultă că prin diagrafia neutron-gama se investighează zona invadată.

Constanta de timp (τ). Pentru reducerea fluctuaţiilor statistice se alege o constantă de timp care variază de la 2 la 5s sau mai mult, iar viteza de înregistrare se stabileşte considerînd 0,3 m pe constanta de timp, deci 540—216 m/h. La viteze mari de extragere, diagrafiile înregistrate sînt mai aplatizate. Porozitatea calculată pe astfel de diagrafii este mai mare faţă de determinările pe diagrafii înregistrate cu viteze normale de extragere.

1.2. Interpretarea calitativă

Presupunînd că se plasează sursa de neutroni la o distanţă de 40—50 cm faţă de detector, rocile cu porozitate redusă (de ex. 5%) vor fi reprezentate pe curba $n\gamma$ prin anomalii cu amplitudini maxime, deoarece pentru o asemenea porozitate densitatea maximă de neutroni termici este la o distanţă de circa 60 cm.

Cînd concentrația în hidrogen din jurul sursei de neutroni este mare, neutronii sînt încetiniți și captați la o distanță mică de sursă (cazul rocilor cu o porozitate de 30%). Pentru aceste roci, densitatea maximă de neutroni termici este la o distanță de 20 cm; în consecință la detector vor ajunge un număr redus de radiații γ și rocile cu porozitate mare vor fi reprezentate pe curba $n\gamma$ prin anomalii cu amplitudini reduse.

Într-o formațiune care nu conține marnă, hidrogenul este prezent în apa, în petrolul sau în gazele care saturează porii rocilor.

Concentrațiile de hidrogen din apă și din petrol sînt apropiate și, în consecință, numărul reacțiilor de captură într-o formațiune saturată cu apă sau cu petrol este același, dacă porozitatea rămîne neschimbată. De aceea, pe diagrafiile $n\gamma$ rareori se poate diferenția limita dintre petrol și apă.

Concentrația de hidrogen în gaze este mai redusă decît în apă și în petrol (v. tab. 5), astfel că, pentru valori egale de porozitate, formațiunea care conține gaze va fi reprezentată pe diagrafia $n\gamma$ prin anomalii ale căror amplitudini sînt mai mari decît amplitudinile anomaliilor din dreptul formațiunii cu apă sau cu petrol. (În fig. X.3, dacă stratul *B* este petrolifer, stratul *A* este gazeifer).

Tabelul 5

	Densități fluid, kg/dm³	Mase de hidrogen, g/cm³	Densitatea globală, kg/dm³
Apă	1,000	0,111	—
Petrol	0,800	0,114	—
CH_4—100 kg/cm²	0,072	0,009	—
CH_4—1000 kg/cm²	0,700	0,090	—
Gresie + apă	1,00	—	2,290
Gresie + CH_4 la 100 kg/cm²	0,072	—	2,104
Gresie + CH_4 la 1000 kg/cm³	0,715	—	2,230

Marnele sînt reprezentate pe diagrafiile $n\gamma$ prin anomalii cu amplitudini mai mici decît ale rocilor curate, datorită marii cantități de hidrogen din apa conținută în pori sau combinată chimic.

În fig. X.3 sînt prezentate profilele gama și neutron-gama înregistrate într-o succesiune de strate argiloase și grezoase, avînd la bază un pachet de calcare (gaura de sondă este umplută cu noroi pe bază de apă dulce). Deasupra adîncimii de 2 550 m se observă alternanța de strate argiloase și gazoase. Gresiile sînt reprezentate pe curba $n\gamma$ prin anomalii cu amplitudini mai mari decît argilele, iar pe curba γ prin

minime de radioactivitate și sînt notate cu *A*, *B*, *C*, *D*, *E*. Marnele sînt reprezentate pe curba $n\gamma$ prin anomalii cu amplitudini minime, iar pe curba γ prin maxime de radioactivitate. Anomaliile cu amplitudini intermediare reprezintă gresii argiloase. Stratul calcaros de la bază

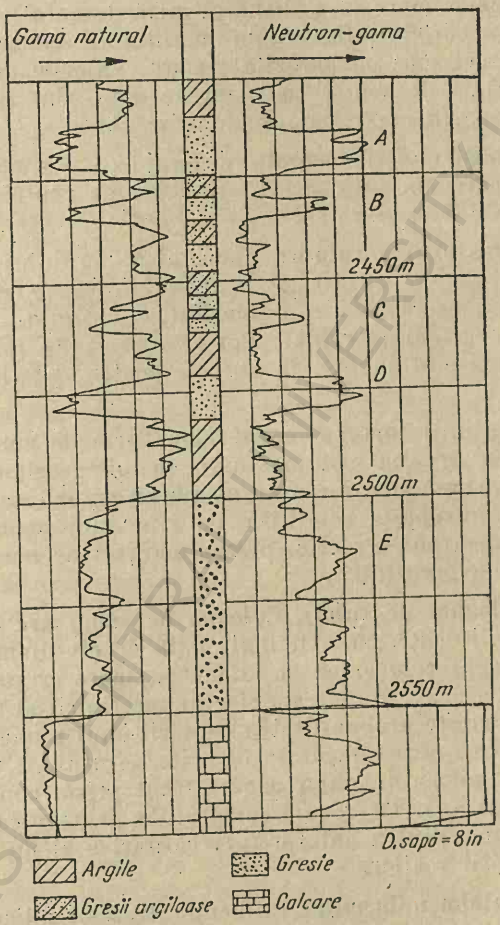


Fig. X.3.

se apreciază ca fiind compact, deoarece pe curba $n\gamma$ este reprezentat printr-o anomalie cu amplitudini foarte mari, iar pe curba γ radioactivitatea naturală este redusă.

Influența diametrului găurii de sondă (d). Creșterea diametrului găurii de sondă, are ca efect creșterea diametrului zonei cu porozitate foarte mare (fluidul din gaura de sondă poate fi considerat ca o zonă a cărei porozitate este de peste 90%). După cum s-a arătat, într-o asemenea zonă foarte bogată în hidrogen, neutronii rapizi vor fi termizați și captați în număr mare la o distanță mică de sursă. În felul acesta, se va înregistra o curbă $n\gamma$ fictivă, cu amplitudini reduse, ca și cum am fi în prezența unei zone cu porozitate mare. Valorile de porozitate determinate în găuri de sondă cu diametre mari sînt fictiv crescute și trebuie corectate. În acest scop se folosesc abace.

Influența rezistivității noroiului de foraj (ρ_n). Rezistivitatea noroiului de foraj practic nu influențează reacțiile de captură atît timp cît procentul de NaCl nu este ridicat.

Influența densității noroiului. Densitatea noroiului de foraj are o mică influență asupra încetinirii neutronilor, cu excepția noroaielor foarte grele. Pe măsură ce crește densitatea noroiului, se reduce efectul încetinirii neutronilor rapizi. Porozitatea scade fictiv. Sînt necesare corecții, care sînt incluse în abacele pentru determinarea porozității.

Influența grosimii turtei de noroi (h_{tn}). Turta de noroi influențează aspectul curbelor $n\gamma$ cu atît mai mult cu cît grosimea ei este mai mare. În fond, turta de noroi este un mediu cu porozitate mare și densitate mică, deci întrunește condițiile de a încetini neutronii rapizi în jurul sursei de neutroni. Practic, prezența turtei de noroi are ca efect creșterea fictivă a porozității.

Influența coloanei de tubaj. Coloana de tubaj are proprietatea de a reține neutronii lenți, cu atît mai mult cu cît diametrul său este mai mare. În cazul coloanelor cu diametru mare crește și cantitatea de lichid din interior, care mărește efectul încetinirii și termizării neutronilor și astfel crește probabilitatea captării unui număr mare de neutroni. Dacă coloana este cimentată în spate, efectul de captare crește, deoarece obișnuit cimentul, chiar dacă a făcut priză, conține totuși un procent ridicat de apă. De regulă, diagrafiile neutronice prin coloană sînt folosite numai pentru interpretări calitative și nu pentru determinarea porozității rocilor.

Influența stratelor adiacente. Influența stratelor adiacente este minimă pentru strate a căror grosime este mai mare de 0,5 m.

Influența zonei invadate. Se deosebesc două cazuri. Primul caz se referă la o zonă invadată al cărei diametru este mai mare de 60 cm, a cărei influență se neglijează. Al doilea caz se referă la o zonă invadată al cărei diametru este redus sub 40 cm. Într-o asemenea formațiune

este posibil să se determine prezența gazelor, în special dacă se fac două înregistrări cu dispozitive avînd lungimi diferite. Stratul cu gaze este reprezentat pe curba $n\gamma$ înregistrată cu un dispozitiv avînd $L_{n\gamma}=60$ cm, printr-o anomalie cu amplitudine mai mare decît pe diagrafia înregistrată cu dispozitiv avînd $L_{n\gamma}=50$ cm (diagrafia ce se obține este similară cu diagrafia neutron-neutron epitermică, înregistrată cu dispozitive *nn* avînd lungimi diferite) v. fig. X.7.

Influența compoziției chimice a mineralelor și a naturii rocilor. În marea majoritate a cazurilor, efectul compoziției chimice a mineralelor ce compun roca este neglijabil. Totuși, cînd se întîlnesc zone în care sînt concentrate elemente cu secțiune eficace mare, compoziția chimică a mineralelor trebuie luată în considerare. Printre elementele cu secțiune eficace mare sînt: borul (720 barni), litiul (70 barni), clorul (32 barni) și altele. Primele două elemente se întîlnesc rar în rocile sedimentare, însă clorul este destul de frecvent, fiind prezent în sare.

Pe diagrafiile $n\gamma$ sarea este reprezentată prin anomalii cu amplitudini crescute față de rocile adiacente, datorită faptului că ea este o rocă compactă. Amplitudinile crescute ale anomaliilor în dreptul rocilor salifere se mai datorează și faptului că radiațiile gama secundare rezultate în urma fenomenelor de captură au energii foarte mari, în jur de 7,5 MeV, ceea ce face să crească eficacitatea detectorului.

În fig. IX. 9 este prezentată o diagrafie $n\gamma$ și γ, înregistrată într-o formațiune saliferă intercalată între strate marnoase. Marnele sînt reprezentate pe curba $n\gamma$ prin anomalii cu amplitudini minime, sarea curată prin anomalii cu amplitudini maxime, iar sarea impură prin anomalii cu amplitudini medii.

Formațiunile cu gips, avînd o porozitate fictiv crescută (deoarece gipsul conține o mare cantitate de apă de cristalizare) sînt reprezentate prin minime.

Sulfurile complexe sînt reprezentate pe curba $n\gamma$ obișnuit prin minime, datorită faptului că sulful are o secțiune eficace relativ mare față de neutronii termici, respectiv 0,49 barni (hidrogenul are numai 0,33 barni).

Cărbunii minerali sînt reprezentați pe curba $n\gamma$ prin minime, deoarece în comparație cu rocile din acoperiș și culcuș conțin mai mulți atomi de hidrogen (gaze sau apă reziduală, v. fig. IX.10).

Anhidritele sînt reprezentate pe curbele $n\gamma$ prin maxime pronunțate, deoarece practic nu conțin hidrogen.

1.3. Determinarea porozității

Determinarea porozității după diagrafiile neutron-gama este greoaie, deoarece acestea sînt influențate de radiațiile gama naturale, de radiațiile gama emise de sursa de neutroni în timpul dezintegrării, de ra-

diațiile gama rezultate în urma captării neutronilor de către noroi și de coloanele de tubaj. Determinarea porozității după diagrafii neutron-gama este descrisă în [4, 5]. În România determinarea porozității rocilor se face după diagrafii neutron-neutron epitermici (vezi cap. X, par. 2).

1.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafia $n\gamma$ se utilizează cu succes pentru investigarea găurilor sondelor tubate, cu toate că prezența coloanelor și a inelului de ciment influențează înregistrările.

Diagrafia $n\gamma$ se poate executa în noroaie sărate fără ca profilele înregistrate să fie mult influențate de prezența clorului (dacă acesta nu este într-un procent prea mare și diametrul găurii de sondă, de asemenea, nu este mai mare de 10—12 in).

Diagrafia $n\gamma$ se poate executa în găuri de sondă săpate cu aer sau gaz, precum și în găuri de sondă săpate cu fluide de foraj pe bază de produse petroliere, cu silicați și, în general, cu orice fel de fluid utilizat în prezent.

În diagrafiile $n\gamma$ și γ marnele constituie repere de corelare, în special pentru sondele vechi tubate la care nu s-au executat investigări geofizice. La sondele vechi, aceste repere se corelează cu diagrafiile electrice înregistrate în sondele din regiunea respectivă.

În condiții favorabile se poate determina limita dintre petrol și gaze, cu condiția ca $dz_i < L_n\gamma$.

Diagrafiile $n\gamma$, împreună cu diagrafiile γ și de microcarotaj, evidențiază zonele poroase din cuprinsul rocilor carbonatate; de aceea, încă de la începutul aplicării ei, metoda a căpătat o largă răspîndire.

Diagrafiile $n\gamma$, în combinație cu diagrafiile γ, $\gamma\gamma$ și de rezistivitate, oferă posibilitatea detectării cărbunilor minerați, dacă rocile adiacente nu au proprietăți radioactive asemănătoare cu ale stratelor de cărbuni. De asemenea, se pot detecta o serie de minereuri cum sînt: minereurile auro-argintifere, minereurile de fier, sulfurile complexe etc., acestea fiind reprezentate pe profile $n\gamma$ prin minime, în majoritatea cazurilor.

2. DIAGRAFIA NEUTRON-NEUTRON LENȚI (nn)

Acest gen de diagrafii au fost concepute în vederea determinării cu mai multă exactitate a porozității rocilor și pentru simplificarea modului de calcul al acesteia. S-a arătat că diagrafiile neutron-gama sînt influențate de radioactivitatea naturală a rocilor și de radiațiile gama emise în momentul dezintegrării sursei de neutroni. Eliminarea acestor influențe din valorile radioactivității gama de captură este destul

de greoaie, iar exactitatea acestei operații este nesatisfăcătoare, din cauza fluctuațiilor statistice.

Diagrafiile neutron-neutron lenți nu sînt influențate de radioactivitatea naturală a rocilor și nici de radiațiile gama emise în momentul dezintegrării sursei de neutroni.

Diagrafiile înregistrate sînt efectul direct al încetinirii neutronilor care s-au ciocnit pe parcurs cu atomii de hidrogen din roci.

2.1. Principiul metodei, dispozitivul și schema principială de măsură

Primele diagrafii de tipul neutron-neutron lenți au fost făcute prin înregistrarea atît a neutronilor termici cît și a neutronilor epitermici și metoda a fost denumită *neutron-neutron termici*. Practica a dovedit că prin înregistrarea neutronilor termici și epitermici în același timp se obțin diagrafii mult influențate de fluctuațiile statistice, deoarece neutronii termici sînt captați și de moleculele elementelor cu secțiune eficace mare și, în special, de moleculele atomilor de Cl. Pentru a se elimina înregistrarea neutronilor termici s-a plasat o placă de cadmiu de 0,75 mm în jurul detectorului de neutroni (cadmiul este un excelent filtru pentru neutronii termici). În felul acesta s-a eliminat înregistrarea neutronilor termici care provocau o instabilitate în înregistrarea diagrafiilor. Diagrafiile înregistrate în modul arătat reflectă numai răspunsul neutronilor epitermici și metoda a fost denumită metoda *neutron-neutron epitermici*. Fluctuațiile statistice pe diagrafiile neutron-neutron epitermici sînt reduse, deoarece neutronii epitermici reacționează față de atomii de hidrogen și față de atomii de clor în același fel, în sensul că sînt numai încetiniți și nu captați. În continuare se va descrie numai diagrafia neutron-neutron epitermică.

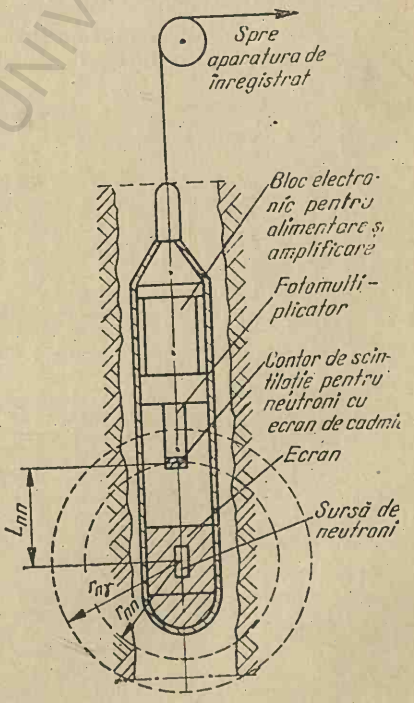


Fig. X.4. Schema dispozitivului neutron-neutron-epitermici:

r_{nn} — limita fictivă la care apar neutronii epitermici; $r_{n\gamma}$ — limita fictivă de la care apar fenomenele de captură a neutronilor termici.

Deosebirea, în sens general, dintre dispozitivul de măsură utilizat în investigările neutron-gama şi cel utilizat în investigările neutron-neutron lenţi constă numai în aceea că primul dispozitiv are contor pentru detectat radiaţii gama, iar al doilea are contor pentru detectat neutronii lenţi; în rest, schema de principiu a dispozitivelor este asemănătoare.

Raza de investigare a dispozitivelor neutron-neutron epitermici, după cum era de aşteptat, este ceva mai redusă decît a dispozitivelor neutron-gama, deoarece în condiţii identice de lucru zona cu neutroni epitermici este ceva mai spre centrul sferei, după cum este indicat în fig. X.4 ($r_{nn} < r_{nγ}$). Ca urmare, contorul de scintilaţie al dispozitivului *nn* se plasează mai aproape de sursa de neutroni rapizi. Firma Schlumberger plasează detectorul de neutroni la 40 cm faţă de sursă, iar firma P.G.A.C. plasează contorul de neutroni la 32 cm faţă de sursă, iar detectorul pentru radiaţii gama de captură la 40—45 cm.

2.2. Interpretarea calitativă

Pe diagrafiile neutron-neutron, ca şi în cazul diagrafiilor neutron-gama, anomaliile cu amplitudini mari reprezintă formaţiuni cu porozitate scăzută, iar anomaliile cu amplitudini reduse reprezintă formaţi-

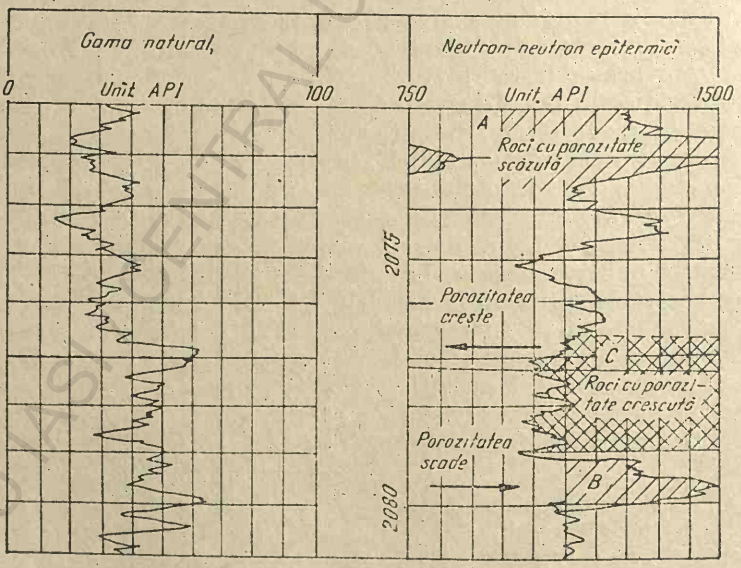


Fig. X.5. Diagrafie neutron-neutron epitermici.

uni cu porozități mari. Explicația este că în medii poroase cantitatea atomilor de hidrogen fiind mare, neutronii sînt termizați și captați în vecinătatea sursei și numai un procent redus din neutronii epitermici ajung la contor. În cazul rocilor cu porozitate redusă, numărul atomilor de hidrogen este redus, astfel că maximul de neutroni epitermici va fi la o distanță mai mare de sursă și în felul acesta la contor va sosi un număr crescut de neutroni epitermici, deci și numărul impulsurilor pe minut va crește. În fig. X.5 este prezentată o diagrafie neutron-neutron epitermici înregistrată cu dispozitiv PH—125 P.G.A.C., sursa de neutroni fiind americiu-beriliu. Rocile din dreptul intervalelor notate cu *A* și *B* au porozitate scăzută, deoarece amplitudinile anomaliilor au valori ridicate (1 600 respectiv 1 500 unități A.P.I.*). Rocile din dreptul intervalului notat cu *C* au porozitate mai mare decît primele, deoarece amplitudinile anomaliilor din dreptul acestui interval sînt mai reduse decît ale anomaliilor din dreptul intervalelor *A* și *B*.

Factorii care influențează aspectul profilelor neutron-neutron lenți sînt aceiași ca în cazul diagrafiei neutron-gama.

2.3. Determinarea porozității după diagrafia neutron-neutron lenți

Deși diferiți autori determină în mod diferit porozitatea, totuși sînt o serie de reguli comune tuturor metodelor, care sînt redate în continuare.

Într-o formațiune saturată cu lichid protonic (apă, petrol sau gaze) ecuația cu care se determină porozitatea totală a rocilor este:

$$\lg \varnothing = AN + B \qquad (X.2)$$

în care $\varnothing$ este porozitatea; N — unități neutronice; A și B — constante care se determină experimental.

Legea enunțată are valabilitate în special în domeniul porozităților mai mari de 15%, deoarece în acest domeniu matricea intervine mai puțin la încetinirea neutronilor, cu excepția argilelor și marnelor.

Porozitatea determinată după profilele neutronice este în linii generale mai mare decît porozitatea reală, deoarece în măsurătoare intervin și atomii de hidrogen din apa de constituție, din apa de cristalizare

* Unitatea neutron A.P.I. este 1/1 000 din diferența a două citiri: 1) cînd dispozitivul este fără sursa de neutroni (prima citire) și 2) cînd dispozitivul este introdus cu sursa în puțul etalon al Universității din Houston-Texas în dreptul calcarelor a căror porozitate este de 19%, puț care are un diametru de 7 7/8 in și este plin cu apă (a doua citire).

și din apa adsorbită, deci corespunde unui volum de lichid protonic fictiv, în care sînt incluși toți atomii de hidrogen.

Densitatea noroiului de foraj influențează valorile de porozitate și, de aceea, sînt necesare corecții, care sînt incluse în abacele pentru determinarea porozității (v. fig. X.6).

Cînd între valorile porozităților determinate pe curbele *nn* și pe carote sînt diferențe apreciabile (valorile de pe carote sînt mai mici) înseamnă că roca a avut un procent ridicat de marne.

Pentru determinarea porozității utile ($\varnothing_u$) în cazul rocilor murdare se utilizează relația:

$$\varnothing_n = \varnothing_u + a \cdot p \qquad (X.3)$$

în care $\varnothing_n$ este porozitatea determinată după diagrafia neutronică; a — un coeficient; p — procentul de argilă.

Pentru determinarea porozității rocilor după profilele *nn*-termici s-au construit numeroase tipuri de abace, însă modul lor de folosire este în linii generale asemănător. În fig. X.6 este redată o abacă de lucru construită de firma P.G.A.C. pentru determinarea porozității în gaură netubată umplută cu noroi, cînd se folosește aparatul REH-15-epitermic. Datele din abacă sînt pentru roci curate și sursă de neutroni Be+Ra. Datele necesare pentru utilizarea abacei sînt: diametrul găurii de zonă; sensibilitatea de înregistrare în unități API/diviziune; densitatea noroiului și mărimea amplitudinii anomaliei din dreptul stratului studiat, exprimată în diviziuni (v. datele de pe figura 6).

Utilizarea abacei din fig. X.6. Se înscrie diametrul sondei la partea superioară a ordonatei abacei, de unde se trasează orizontala pînă intersectează curba corespunzătoare densității noroiului de foraj. Se trasează verticala în jos, pînă intersectează linia sensibilității de lucru. În continuare, se trasează orizontala spre dreapta; se ridică de pe abscisă verticala din dreptul punctului care indică mărirea amplitudinii anomaliei din dreptul stratului studiat, în diviziuni, pînă intersectează orizontala trasată anterior; punctul de intersecție reprezintă porozitatea, care se citește la partea superioară sau în partea dreaptă a abacei. (Se trasează o dreaptă înclinată prin punctul obținut).

În continuare se vor descrie numai dispozitivul și diagrafia SNP (sidewall epithermal neutron porosity) pentru determinarea porozității rocilor realizată de firma Schlumberger.

Aparatura SNP permite corectarea automată a influenței variației diametrului găurii de sondă, a salinității și densității noroiului de foraj și temperaturii.

Dispozitivul de măsură este de forma celor cu patină. Pe patină, care presează puternic pe peretele găurii sondei, sînt montate sursa de neutroni ($Am^{241}+Be^{9}$) și detectorul. Ca urmare se diminuează mult influența găurii de sondă.

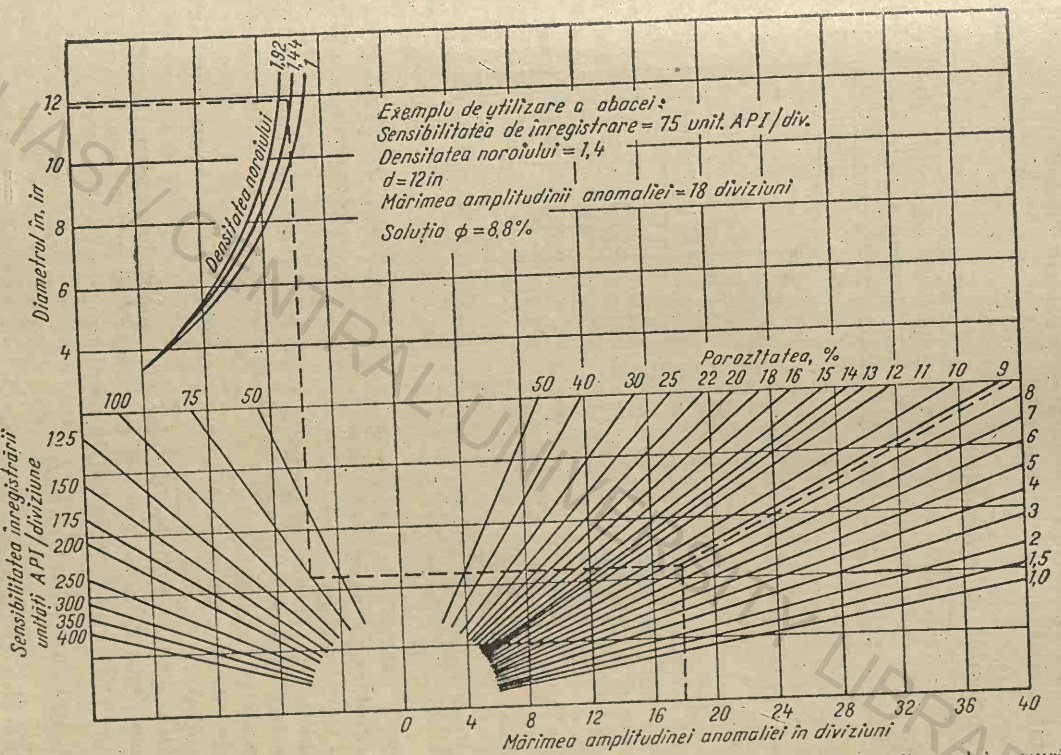


Fig. X.6. Abacă pentru determinarea porozității rocilor utilizînd dispozitiv REH-15-epitermal în gaură de sondă netubată umplută cu noroi de foraj (aparat necentrat).

Aparatura de suprafață prelucrează informațiile primite de la detector și se înregistrează în final o curbă calibrată în termeni de porozitate. Această curbă de porozitate poate fi înregistrată pentru trei genuri de formațiuni: gresie, calcar și dolomit.

2.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafiile neutronice se folosesc la separarea stratelor din profilul sondei, pe baza variației conținutului în hidrogen, separarea care este

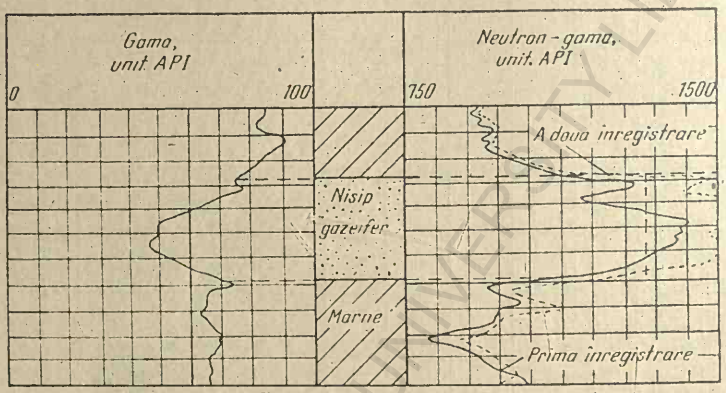


Fig. X.7. Diagrafii neutronice înregistrate cu dispozitive de lungimi diferite. La prima înregistrare L_{nn} $(L_{n\gamma}) < d_{zi}$; la a doua înregistrare L_{nn} $(L_{n\gamma}) > d_{zi}$.

utilă la corelarea diagrafiilor, atît în cazul sondelor netubate cît și în cazul celor tubate.

Aplicabilitatea cea mai importantă o au în determinarea porozității rocilor curate, în special în sonde netubate și mai rar în cele tubate (în care este mai puțin indicată).

În unele cazuri este posibil a se determina limita dintre apă-gaze sau gaze-petrol.

Diagrafiile *nn* ca și diagrafiile *nγ* sînt utilizate pentru detectarea stratelor gazeifere. În acest scop se recomandă să se facă două înregistrări cu dispozitive *nn* (*nγ*) avînd lungimi diferite (v. fig. X.7).

3. ALTE DIAGRAFII NEUTRONICE

3.1. Diagrafia clorului

Diagrafia clorului se fundamentează fizic pe faptul că secțiunea eficace a elementelor în interacțiunea lor cu neutronii termici este diferită,

iar energia cuantelor gama emise în urma reacțiilor de captură este caracteristică elementului care a captat neutronii.

În tabelul 6 sînt redate valorile secțiunilor eficace pentru unele elemente, precum și energiile radiațiilor gama emise în urma reacțiilor de captură.

Tabelul 6

Elemente	Secțiune eficace (barn)	Gama, MeV	Elemente	Secțiune eficace (barn)	Gama, MeV
			Hidrogen	0,33	2,23
Bor	750		Siliciu	0,13	6,4 —4,95
Litiu	70		Aluminiu	0,22	7,72—3,02
Clor	32	7,77—7,42	Magneziu	0,059	8,16—3,92
Sodiu	0,49		Carbon	0,0045	4,95—4,05
Sulf	0,49	5,43—4,84	Oxigen	0,0042	—
Calciu	0,42	6,42—5,89			

Din analiza datelor din tabelul menționat se observă că borul, și după aceea litiul, au secțiunile eficace cele mai mari. Borul și litiul însă nu sînt atît de răspîndite în natură și cu atît mai puțin în rocile sedimentare. Al treilea element cu secțiune eficace mare este clorul, care este foarte răspîndit în rocile sedimentare; în plus energia radiațiilor gama emise în urma reacțiilor de captură are cele mai mari valori, de la 7,42 la 7,77 MeV.

Diagrafia clorului se realizează fie prin analiza spectrală a radiațiilor gama de captură, fie prin simpla înregistrare a radiațiilor gama de captură.

Diagrafia clorului utilizînd spectrometru de sondă. Dispozitivul utilizat în această variantă este un spectrometru cu contor de scintilație pentru radiații gama. Cu spectrometrul de sondă, construit de firma P.G.A.C., se pot înregistra selectiv energii de 1—10 MeV. Spectrometrul propriu-zis se găsește la o distanță de circa 60 cm deasupra sursei de neutroni și este astfel construit încît se pot executa simultan curba clorului și curba de referință *nn*-termici. Detectorul utilizat pentru înregistrarea curbei *nn* de referință este situat la 50 cm deasupra sursei de neutroni. Înregistrarea curbei clorului se face avînd fereastra spectrală reglată pentru energii ale radiațiilor gama de 7—7,5 MeV, proprii clorului. În fig. X.8 este prezentată o diagrafie a clorului înregistrată cu spectrometru P.G.A.C. Se apreciază că sîntem în prezența unui strat cu apă sărată cînd în dreptul unui interval amplitudinile anomaliilor de pe curba clorului sînt mai mari decît amplitudinile anomaliilor de pe curba de referință.

În afară de cele două curbe continui executate de-a lungul găurii sondei, firma P.G.A.C. obișnuiește a opri dispozitivul la diverse adîn-

cimi, la care se înregistrează spectrograme complete, de la 1 MeV la 10 MeV (v. fig. X.8). În acest mod, prezența sau absența unui vîrf în zona de 7 MeV indică prezența sau absența clorului în intervalul cercetat.

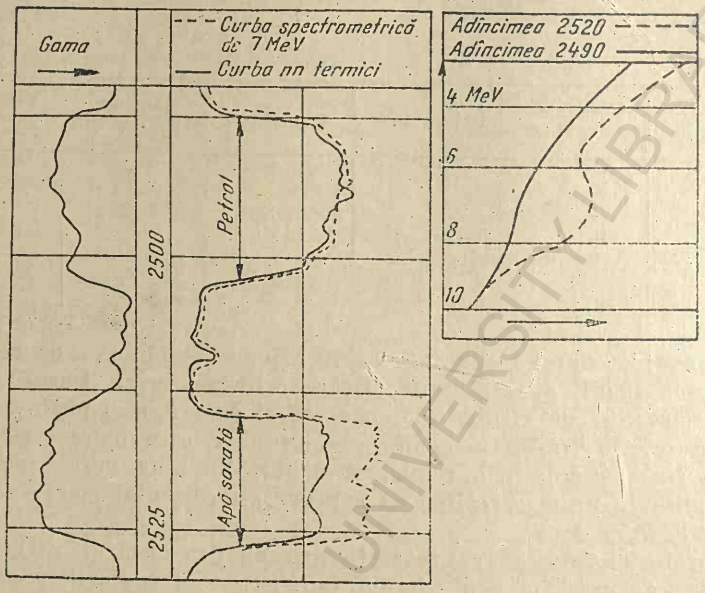


Fig. X.8. Diagrafia clorului înregistrată cu dispozitiv P.G.A.C. [14].

Diagrafia clorului utilizînd dispozitiv neutron-gama obișnuit. În timpul forajului, în unele strate cu porozitate redusă pătrund cantități însemnate de filtrat pe adîncimi de ordinul metrilor, care dislocă majoritatea fluidelor conținute în porii rocilor. În cazul cînd stratul invadat a conținut apă sărată, aceasta nu poate fi detectată prin metodele obișnuite de investigare. Singura cale de a detecta prezența apei sărate cînd zona invadată depășește 2—4 m este diagrafia clorului, executată după metodologia descrisă în continuare.

Înainte de tubajul sondei, preferabil imediat după tubarea acesteia, se execută diagrafia neutron-gama utilizînd un dispozitiv $n\gamma$ obișnuit. După un interval de 7—10 zile se execută o a doua curbă neutron-gama. În intervalul de timp dintre cele două înregistrări, conform legilor concentrațiilor, clorura de sodiu (care a fost dislocată de filtrat spre interiorul stratului) difuzează dinspre strat spre gaura de sondă, restabilindu-se astfel echilibrul concentrațiilor celor două fluide (filtratul și apa sărată din strat).

În cazul celei de-a doua înregistrări, numărul radiațiilor gama de captură este mai mare față de prima, deoarece se captează un număr crescut de neutroni termici, ca urmare a creșterii numărului atomilor

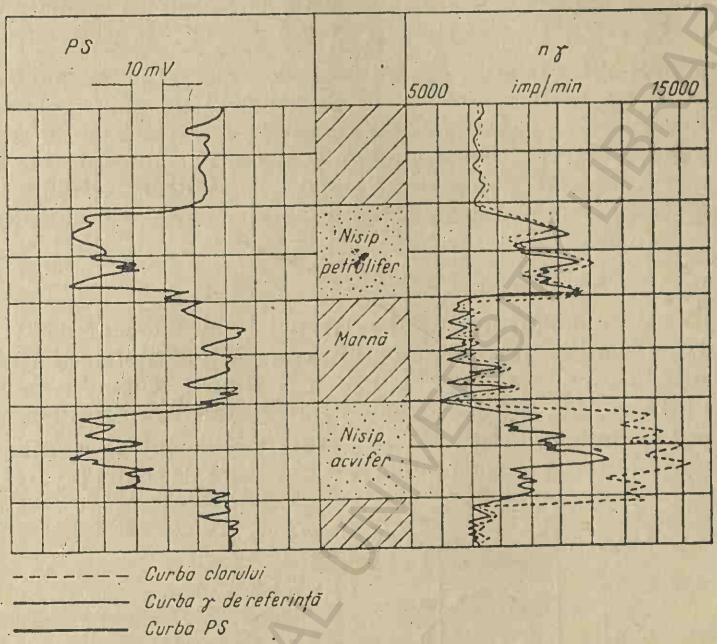


Fig. X.9. Diagrafia clorului înregistrată cu dispozitiv neutron-gama obișnuit.

de Cl din zona invadată (atomii de Cl au secțiunea eficace mai mare decît a atomilor de H). În plus, energia radiațiilor gama de captură rezultate din reacția $Cl^{35}+n_0^1 \rightarrow \gamma+Q$ (7,42—7,7 MeV) fiind de circa 2,5 ori mai mare decît energia radiațiilor gama de captură rezultate din reacția $H_1^1+n_0^1 \rightarrow \gamma+Q$ (2,23 MeV), crește eficiența detectorului de radiații gama a dispozitivului de măsură. Ca urmare, pe curba de referință stratul cu apă sărată va fi reprezentat printr-o anomalie cu amplitudine mai redusă decît amplitudinea anomaliei de pe curba clorului, după cum se arată în fig. X.9. [8].

3.2. Diagrafii ale timpului de viață a neutronilor

Diagrafiile care au fost descrise pînă în prezent sînt obținute prin bombardarea formațiunilor cu neutroni rapizi, emiși de o sursă de neutroni (α+Be) al cărei spectru energetic mediu este de 4 pînă la 6 MeV.

Diagrafiile timpului de viață a neutronilor se obțin prin bombardarea formațiunilor cu neutroni rapizi mono-energetici în regim de impulsuri, a căror energie este de peste 14 MeV. Aceste diagrafii se realizează în două variante, după cum se înregistrează o curbă sau două curbe neutron termici.

Principiul metodelor și generatorul de neutroni. Se bombardează formațiunile cu un flux intermitent de neutroni rapizi monoenergetici, a căror energie este de peste 14 MeV, utilizînd în acest scop un generator de neutroni. Neutronii rapizi, în urma ciocnirilor repetate cu atomii, sînt repede termizați și captați. Numărul de neutroni termici care nu sînt captați de mediul înconjurător după un timp t_1 se calculează cu relația:

$$N = N_0 e^{-\sigma v t_1} \qquad (X.4)$$

în care: N este numărul neutronilor termici la un moment dat t; N_0 — numărul neutronilor rapizi la timpul 0; σ — secțiunea eficace a substanței ciocnite; v — viteza neutronilor; t_1 — timpul scurs din momentul emiterii neutronilor rapizi și momentul înregistrării neutronilor termici.

Timpul t_1 trebuie astfel ales încît reacțiile de captură să aibă loc în formațiunea investigată și nu în noroiul din gaura de sondă (v. fig. X.10).

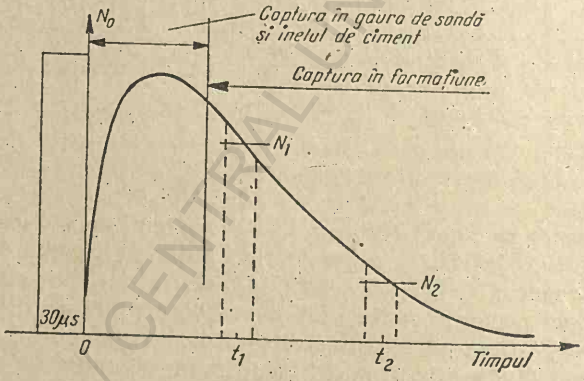


Fig. X.10. Variația numărului de neutroni în timp (după R. Desbrandes):
N_1, N_2 — numărul de neutroni termici la momentele t_1 și t_2;
N_0 — numărul neutronilor rapizi la timpul 0.

Generatorul de neutroni (fig. X.11) se compune dintr-un accelerator de particule, care cuprinde: sursa de deuteriu (H_1^2), reprezentată prin spirala de titan *5* saturată cu deuteriu, catodul din volfram *4*, anodul

cilindrului *3* și electrodul accelerator, care în același timp este și ținta *2*.* Electrodul accelerator *2* conține tritiu (H_1^3). Tubul de sticlă se află în interiorul unui solenoid *6*, care creează în interiorul anodului cilindric *3* un cîmp magnetic permanent. Cu ajutorul condensatorului *7* și al trans-

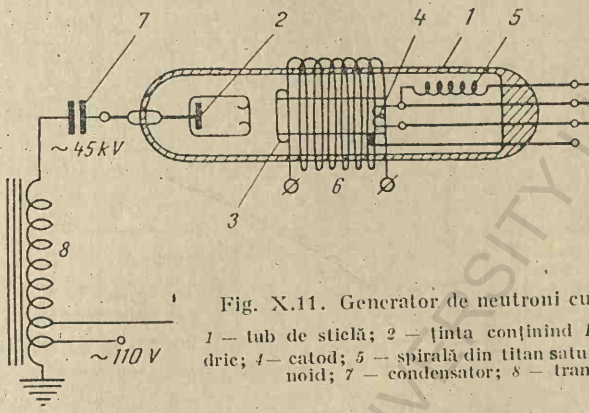


Fig. X.11. Generator de neutroni cu tritiu-deuteriu:
1 — tub de sticlă; *2* — ținta conținînd H_1^3; *3* — anod cilindric; *4* — catod; *5* — spirală din titan saturată cu H_1^2 *6* — solenoid; *7* — condensator; *8* — transformator.

formatorului *8* se aplică tensiunea de accelerare de circa 90 kV. Emisiunea neutronilor are loc ca urmare a reacției

$$H_1^3+H_1^2\rightarrow H_2^4+n_0^1+Q>14 \text{ MeV} \qquad (X.2)$$

În cursul emisiunii de neutroni se consumă deuteriu din tub. Treptat însă acesta este înlocuit în mod automat cu deuteriu acumulat în spirala de titan *5*.

Durata unui impuls este de 40 μs, iar frecvența este de 1 000 Hz. Detectorul pentru neutroni este situat la o distanță de 40 cm față de generatorul de neutroni.

Diagrafia timpului de viață a neutronilor cînd se înregistrează o singură curbă *nn*—termici. Metoda are drept scop principal determinarea limitei apă sărată-petrol, apă sărată-gaze și petrol-gaze în cuprinsul unui colector. Timpul de viață al neutronilor termici în prezența hidrocarburilor este aproximativ de două ori mai mare decît într-un strat acvifer, deoarece apele de zăcămînt conțin clor, a cărui secțiune eficace este mai mare decît a atomilor de H și C (v. tabelul 6). Deci, pentru aceeași durată de emisie t_1 a neutronilor N_0 de către generatorul de neutroni, numărul de neutroni termici N existenți în formațiune depinde de secțiunea eficace σ a elementelor cu care interacționează neutronii (v. relația X.4).

Pe o diagrafie a timpului de viață a neutronilor în regim de impulsuri, cînd se înregistrează o singură curbă neutron-neutron termici, porțiunea

din strat saturată cu gaze este reprezentată prin anomalii avînd amplitudini mai mari decît ale anomaliilor din dreptul porțiunii din strat saturată cu petrol; porțiunea din strat saturată cu apă sărată este repre-

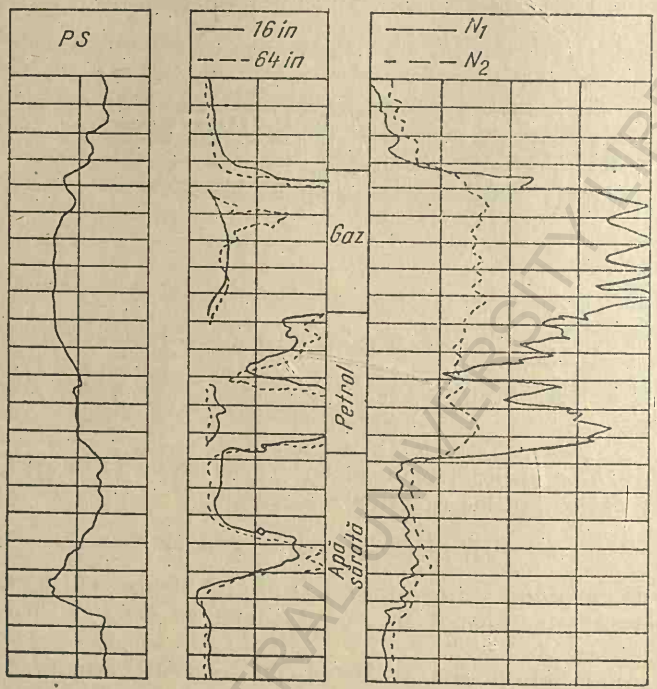


Fig. X.12. Diagrafia timpului de viață a neutronilor (reprezentare schematică).

zentată prin anomalii cu amplitudini reduse în comparație cu primele (v. curba N_1 din fig. X.12).

Diagrafiile timpului de viață a neutronilor în regim de impulsuri cînd se înregistrează o singură curbă neutron-neutron termici se mai folosesc pentru urmărirea avansării contactului apă sărată-petrol, apă sărată-gaze în timpul procesului de extracție, precum și în scopurile arătate la metodele neutronice $n\gamma$ și nn.

Diagrafia timpului de viață a neutronilor cînd se înregistrează două curbe nn-termici. Dacă se fac două înregistrări la intervale diferite de timp t_1 și t_2 se obțin pentru timpii respectivi numărul de neutroni termici N_1 și N_2 și astfel se poate determina secțiunea eficace σ a substanței bombardate (v. fig. X.10), respectiv natura sa.

Dispozitivul de măsură utilizat este prezentat în fig. X.13. Prin faptul că într-o secundă măsurătoarea se repetă de 1 000 ori se pot înregistra două curbe continui, N_1 și N_2, după cum se vede în fig. X.12, în care s-au reprezentat și curbele de rezistivitate normale de 16 in și 64 in, precum și curba PS. Se constată o corelație între curbele de rezistivitate și cele două curbe N_1 și N_2.

Determinarea saturației în apă (S_w), utilizînd relațiile care exprimă secțiunea eficace totală a formațiunii σ (rel. 6) și secțiunea eficace a fluidului σ_f (rel. 7):

$$\sigma=\sigma_f\varnothing+\sigma_m(1-\varnothing) \quad (X.6)$$

în care $\varnothing$ este porozitatea; σ — secțiunea eficace totală a formațiunii; σ_f — secțiunea eficace a fluidului; σ_m — secțiunea eficace a matricei.

În același mod se poate scrie

$$\sigma_f=\sigma_w S_w+\sigma_H(1-S_w), \quad (X.7$$

unde σ_w este secțiunea eficace a apei din formațiune; σ_H — secțiunea eficace a hidrocarburilor; S_w — saturația cu apă a porilor formațiunii.

Din cele două relații se obține:

$$S_w=\frac{\sigma-\sigma_m}{\varnothing(\sigma_w-\sigma_H)}+\frac{\sigma_m-\sigma_H}{\sigma_w-\sigma_H} \quad (X.8)$$

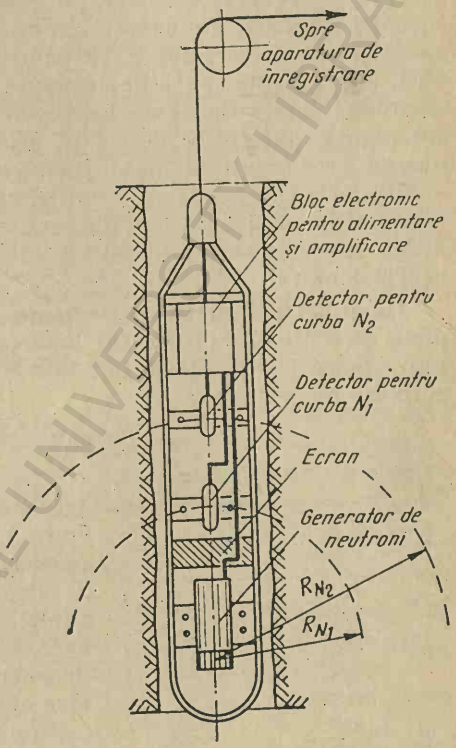


Fig. X.13. Dispozitiv de măsură utilizat pentru diagrafia timpului de viață a neutronilor.

Cu ajutorul acestei metode se pare că va fi posibil să se determine saturația în apă, chiar dacă gaura de sondă este tubată, ceea ce ar prezenta un mare avantaj.

3.3. Diagrafii prin activare cu neutroni

Se deosebesc două cazuri: activare prin bombardare cu neutroni rapizi cu energie mai mare de 14 MeV, care sînt emiși de un generator

de neutroni, și activare prin bombardare cu neutroni rapizi cu energie mai mică de 6 MeV, emiși de o sursă de neutroni.

Diagrafii prin activare cu neutroni rapizi a căror energie este mai mare de 14 MeV. Bombardînd o substanță cu neutroni rapizi avînd $E_n > 14$ MeV, aceștia suferă o serie de ciocniri neelastice urmate de ciocniri elastice. În cursul ciocnirilor neelastice o parte din energia neutronului este cheltuită atît pentru a transmite nucleului energie cinetică, cît și pentru a excita substanța nucleară. În acest caz, nucleul care a produs împrăștierea neelastică a neutronului este în stare excitată. De regulă, nucleul se dezexcită prin emisia unei cuante gama, a cărei energie este funcție de natura nucleului care a fost excitat. Folosind un spectrometru de sondă și înregistrînd radiațiile gama (de dezexcitare) de o anumită energie se poate determina direct prezența oxigenului, carbonului, hidrogenului, siliciului și altor elemente. Metoda este în curs de experimentare.

Diagrafii prin activare cu neutroni rapizi a căror energie este mai mică de 6 MeV. Sub efectul bombardării cu neutroni rapizi sau lenți, unii atomi devin radioactivi, însă numărul lor este redus. Exemplu de activare cu neutroni:

$$Mn_{25}^{55} + {}_0^1 n \rightarrow Mn_{25}^{56} + \gamma + Q \qquad (X.9)$$

Tabelul 7

Elementul	Timpul de înjumătățire	Energia, MeV
Mn^{56}	2,28 ore	1,81
O^{16}	29,5 S	1,60
Al^{28}	2,27 min	1,78
Cl^{38}	37,30 min	2.15
Si^{31}	2.62 h	1,26
Na^{24}	15,00 h	1,38–2,76
Ca^{47}	4,7 zi	1,31

În tabelul 7 sînt indicați o serie de izotopi care au fost formați prin activare indusă, indicîndu-se timpul de înjumătățire și energia radiațiilor gama emise.

Pentru bombardarea rocilor cu neutroni rapizi se pot activa mai multe elemente, care, după activare, emit radiații gama de energii diferite. Cînd înregistrarea se face cu spectrometre de sondă se poate determina direct prezența O, C, H, Al, Si, Mn, Cu etc. Cînd se folosesc dispozitive neutron-gama obișnuite, se înregistrează o radioactivitate indusă globală și rezultatele au un caracter orientativ.

Înregistrarea se face prin puncte sau continuu. Înregistrarea prin puncte se face în cazul elementelor care necesită un timp mai îndelungat pentru a fi activate, ca de exemplu Ca^{47}, Si^{31} etc. Înregistrarea continuă se face cînd timpul pentru activare este redus, ca de exemplu pentru Al^{28}, Cl^{38} etc.

În fig. X.14 se prezintă o diagrafie de activare cu neutroni care constă dintr-o curbă gama de referință și curba activării induse. Intervalul în care se găsește elementul activat se recunoaște pe curba gama a activării

induse prin creșterea radioactivității ca urmare a surplusului de radiații gama emise de nucleele elementelor activate.

În metodele de activare cu neutroni se poate urmări fie formarea unui izotop al unui element cercetat, fie formarea unui izotop al unui ele-

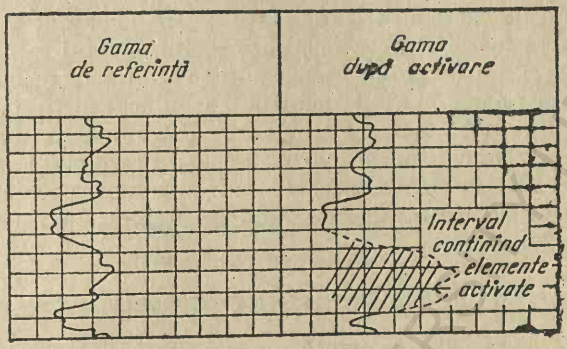


Fig. X.14. Diagrafie de activare cu neutroni rapizi.

ment secundar, genetic legat de elementul principal. De exemplu, activarea argintului pentru zăcămintele auroargintifere, activarea manganului pentru cercetarea zăcămintelor de fier etc. Date suplimentare despre activarea cu neutroni se găsesc în bibliografia de specialitate [10, 12, 13].

3.4. Diagrafii ale rezonanței nucleare

În fizica nucleară se cunosc două categorii de fenomene ale rezonanței nucleare: rezonanțe nucleare ale nucleelor atomilor față de neutroni și rezonanțe nucleare ale nucleelor atomilor față de radiațiile gama.

3.4.1. *Diagrafia rezonanței neutronice*

Fenomenul de rezonanță neutronică are loc în cazul interacțiunii dintre un neutron și nucleul unui atom, urmată de capturarea neutronului, care determină o transmutație nucleară și apariția unui izotop al elementului iradiat. Energia excedentară a nucleului rezultat este emisă sub forma unei cuante gama. Reamintim interacțiunea binecunoscută a neutronului cu protonul:

$$H_1^1 + n_0^1 \rightarrow H_1^2 + \gamma + Q \qquad (X.10)$$

Această interacțiune nu reprezintă o rezonanță neutronică.

Pentru anumite valori ale energiei neutronilor, reacția $n\gamma$ se desfășoară foarte intens, adică are loc un fenomen de rezonanță neutronică.

Astfel, captarea neutronilor de către izotopul aurului Au_{79}^{198} se face foarte intens cînd energia neutronilor este de 4,9 eV, iar în cazul izotopului argintului Ag_{47}^{107} cînd neutronii au o energie de 5,1 eV, etc. În timpul interacțiunii de captare în domeniul rezonanței neutronice, emisiunea de radiații γ este maximă. Dacă s-ar găsi posibilitatea bombardării formațiunilor cu neutroni de energie dinainte stabilită, de exemplu de 4,9 eV, s-ar putea detecta cu foarte mare ușurință prezența aurului în roci. Pentru o asemenea energie a neutronilor numai aurul va intra în rezonanță nucleară, ar capta un număr mare de neutroni, și în același timp, ar emite un număr mare de radiații gama. Utilizînd un detector de radiații gama, în dreptul intervalelor cu aur pe curba gama de rezonanță neutronică ar apărea anomalii cu amplitudini foarte mari în comparație cu restul intervalului în care aurul este absent. Pînă în prezent nu s-a proiectat un dispozitiv de acest fel.

3.4.2. *Diagrafia fluorescenței datorită rezonanței gama*

Al doilea fenomen de rezonanță nucleară cunoscut este *efectul Mössbauer*, conform căruia nucleele atomilor pot să treacă din starea fundamentală în stare excitată, dacă primesc exact energia corespunzătoare excitării lor (cu o aproximație de 10^{-8}) sub formă de radiații gama.

În esență, fenomenul de rezonanță nucleară reprezintă trecerea nucleului unui atom la o stare excitată cînd primește energia critică de excitare. La prima vedere s-ar părea că obținerea energiei critice de excitare este extrem de greu de realizat, întrucît eroarea admisă este de 10^{-8}. Construirea unei aparaturi cu o finețe atît de ridicată și la dimensiuni reduse, pentru investigări în găuri de sondă, nu este posibilă. Totuși, pe baza datelor observate s-a stabilit că nucleul unui element activat prin bombardare cu neutroni emite un fascicul de radiații gama, în urma feno-

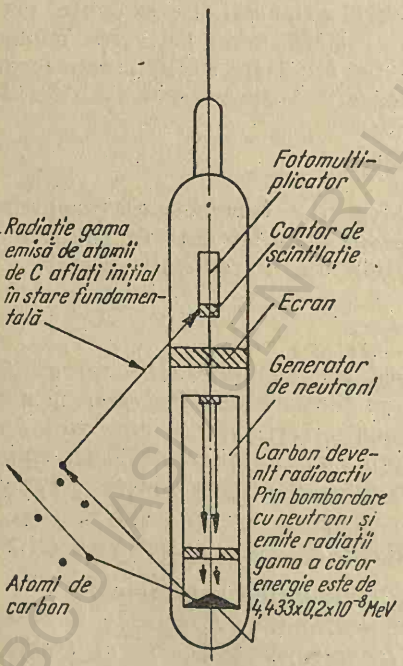


Fig. X.15. Schema dispozitivului pentru diagrafia fluorescenței rezonanței gama.

menului de captură, al cărui spectru energetic este foarte restrîns. De exemplu, carbonul emite radiații γ a căror energie este de $4{,}433 \pm \pm 0{,}00000002$ MeV. În felul acesta s-a găsit posibilitatea obținerii de spectre energetice de excitare critică. Radiațiile gama emise de nucleul atomului de carbon excitat nu interacționează cu nucleele atomilor a căror energie de excitare critică diferă de $4{,}433 \pm 2^{-8}$ MeV, însă excită nucleele atomilor pentru care această energie este egală cu energia lor critică de excitare. Radiațiile gama emise de carbonul devenit radioactiv prin bombardare cu neutroni excită nucleele atomilor de carbon aflate în stare fundamentală și acestea la rîndul lor emit radiații gama care fiind recepționate de un dispozitiv γ se poate evidenția prezența carbonului.

În fig. X.15 se prezintă schematic dispozitivul pentru diagrafia fluorescenței datorită rezonanței gama (dispozitivul se află în curs de proiectare).

Date suplimentare despre diagrafiile neutronice se găsesc în bibliografia de specialitate [9—13].

BIBLIOGRAFIE

1. Pontecorvo, B. **Neutron Well Logging**/ The Oil and Gaz Journal, vol. 40, nr. 12, 1941, p. 32.
2. Meier, V. A. **Carotaj skvajini pri razvedke polimetallieeskih mesterojdenii.** Izdatelstvo Leningradskogo Universiteta, 1960, p. 164—170.
3. *** **Spravocinik geofizika**/ Vol. II, Moskva, 1961, pp.203—243.
4. Pirson J. Sylvain. **Handbook of Well log Analysis**, 1963.
5. Dahnov, V. N. **Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă**, București, Editura tehnică, 1961, p. 382—380.
6. Peteu, Gh. **Studiu privind introducerea schimburilor de ioni produși de Combinatul chimic „Victoria" în operațiunile cu trasori radioactivi din industria petrolului.** Tehnica nucleară. Aplicații în industrie și agricultură nr. 2, 1965, pp. 82—90.
7. Grosmangin, M. and Walker, E. **Gas Detection by Dual Spacing Neutron Logs in the Greater Oficina Area.** Venezuela, Journ. Petroleum Techn., vol. 9, nr. 5, 1957, p. 140.
8. Gheorghiu, Fl. **Metodă pentru detectarea stratelor cu apă sărată cu ajutorul curbei clorului în găuri de sonde.** Comunicare la al IV-lea Simpozion de prospecțiuni geofizice și fizice globului în România, 5—7 iulie 1966.
9. Tittle, C. W. **The Theory of Neutron Logging I.** Geophysics, vol. 26, nr. 1, 1961, p. 27.
10. Mero, J. L. **Use of the Gamma Ray Spectrometer in Mineral Exploration, Geophysics.** Vol. 25, nr. 5, october, 1960, p. 1 054.
11. *** **Preliminary Neutron Curve Conversion Charts**, Lane-Wells Co, 1958.
12. Iordache, S. **Contribuția metodelor radioactive la cercetarea substanțelor minerale utile.** Rev. Tehnica nucleară nr. 7/1963.
13. Iordache, S. **Metoda gama de activare utilizată în explorarea prin sonde a minereurilor de fier.** Studii și cercetări de geologie nr. 1/1966.
14. *** **Log Analysis Handbook P.G.A.C.**, 1966.

CAPITOLUL XI

DIAGRAFII GAMA

1. DIAGRAFIA GAMA-GAMA

Acest gen de diagrafie a fost propusă de M. Desbrandes [1] în anul 1950. Primul dispozitiv gama-gama a fost construit de Societatea Mc-Cullough, în anul 1953.

1.1. Principiul metodei, dispozitivul și schema principială de măsură

Diagrafia gama-gama constă în a iradia (bombarda) rocile traversate de gaura de sondă cu radiații gama emise de o sursă radioactivă, obișnuit Co^{60}. Se înregistrează radiații gama retroîmprăștiate (dispersate) a căror energie este capabilă ca după ciocnirea cu electronii să producă ionizări într-un sistem de contoare Geiger-Müller, sau impulsuri luminoase într-un contor de scintilație. Interacțiunea se datorează efectului Compton și mai puțin formării de perechi.

Numărul de electroni ai atomilor substanțelor este aproximativ proporțional cu densitatea și, în consecință, numărul interacțiunilor (ciocnirilor) va fi cu atît mai mare, cu cît substanța va fi mai densă. Ca urmare, intensitatea fasciculului radiațiilor gama retroîmprăștiate sosite la detector va fi cu atît mai mare cu cît substanța este mai puțin densă și, invers, intensitatea fasciculului radiațiilor gama retroîmprăștiate scade pe măsură ce densitatea substanței crește.

Atenuarea fasciculului radiațiilor gama ca urmare a interacțiunii acestora cu substanța se face după o funcție exponențială a densității (δ):

$$N = N_0 e^{-K\delta L_{\gamma\gamma}} \qquad \text{(XI.1)}$$

în care: N este numărul radiațiilor gama retroîmprăștiate sosite la detector; N_0 — numărul radiațiilor gama emise de sursă (Co^{60}); K — o constantă; δ — densitatea rocilor; $L_{\gamma\gamma}$ — lungimea dispozitivului.

În fig. XI.1 se prezintă schematic traiectoriile radiațiilor gama emise de sursa Co^{60} a dispozitivului de măsură gama-gama. Timpul de înjumătățire al sursei de radiații este de 5,25 ani, iar energia radiațiilor este cuprinsă

între 1 și 1,5 MeV. Pentru astfel de energii, în urma interacțiunii radiațiilor gama cu electroni predomină efectul Compton.

După cum se vede din fig. XI.1, aparatul este menținut pe peretele găurii de sondă pentru eliminarea influenței noroiului de foraj. Pe generatoarea dispozitivului, care este în contact cu peretele găurii de sondă, se găsesc atît sursa cît și detectorul de radiații gama (v. fig. XI.1).

La aceste dispozitive, detectoarele sînt contoare de scintilație reglate pentru detectarea radiațiilor gama de joasă energie, deoarece în urma numeroaselor ciocniri prin efect Compton radiațiile gama primare pierd energie pînă ajung la contor. Fasciculul de radiație gama incident și detectorul de radiații sînt colimate. Aceasta conduce la mărirea sensibilității diagramei gama-gama la variația densității rocilor.

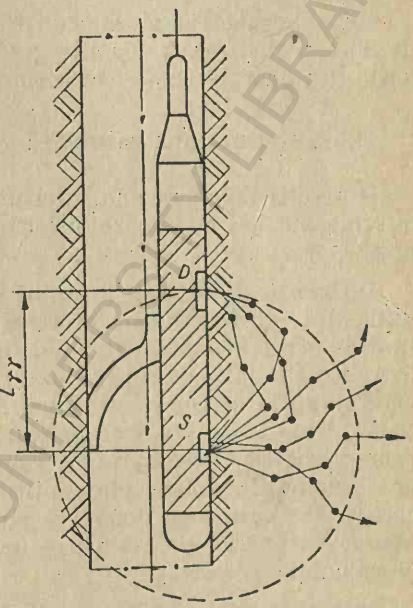


Fig. XI.1. Reprezentarea schematică a traiectorilor radiațiilor retroimprăștiate. Dispozitiv $\gamma\gamma$: S — sursa de radiații gama Co^{60}; D — detector; $L_{\gamma\gamma}$ — lungimea dispozitivului.

Funcționarea dispozitivului gama-gama. Fasciculul de radiații gama incidente emise de sursa Co^{60} sînt mai mult sau mai puțin atenuate prin efect Compton, după cum rocile sînt mai mult sau mai puțin dense, iar radiațiile gama astfel atenuate ajung la detectorul pentru radiații gama. Semnalele detectorului sînt amplificate și transmise la aparatura de suprafață prin intermediul cablului unde sînt filtrate, amplificate, numărate și înregistrate sub forma unei curbe continue în funcție de adîncime.

La realizarea dispozitivului de măsură gama-gama, de mare importanță sînt stabilirea geometriei optime a dispozitivului, respectiv a distanței dintre sursă și detector, grosimea și geometria ecranelor, deschiderea și închiderea canalelor colimatoare.

Lungimea dispozitivului gama-gama ($L_{\gamma\gamma}$) reprezintă distanța între sursă și detector (obișnuit $L_{\gamma\gamma}$=30 cm).

Punctul la care se raportează intensitatea radiațiilor gama retroîmprăștiate înregistrate este plasat la jumătatea distanței dintre sursă și detector.

Calibrarea dispozitivului se realizează prin înregistrarea de curbe pe modele de strate de densități cunoscute sau față de o sursă de radiații gama standard plasată la o distanță determinată de detector.

Unitățile de măsură folosite obișnuit sînt: impulsuri / min sau miliroentgen / h.

Raza de investigare este sub 15 cm, deși lungimea dispozitivului este de 30 cm, deoarece radiațiile gama retroîmprăștiate au pierdut o mare parte din energie prin efect Compton.

1.2. Interpretarea calitativă

Diagrafiile gama-gama nu sînt influențate de conținutul în marnă a formațiunilor, ca în cazul celor mai multe dispozitive cu care se determină porozitatea.

Influența densității fluidului de foraj. Diagrafiile gama-gama sînt influențate de densitatea noroiului de foraj cînd aparatul nu este perfect lipit de peretele găurii de sondă. În acest caz, o parte din radiațiile gama trec prin fluidul de foraj și ajung la detector. Radiațiile gama vagabonde care ajung la detector influențează măsurătoarea, în sensul că se reduce fictiv densitatea, deoarece densitatea noroiului de foraj este mai mică decît a rocilor. Pe diagrafiile gama-gama asemenea situații se recunosc prin anomalii înguste, cu amplitudini mărite față de alura generală a curbei. În paralel cu diagrafia gama-gama este necesar să se observe și microcavernogramele. Asemenea anomalii fictive nu se iau în considerație în calculele porozității.

Influența diametrului găurii de sondă (d). Variațiile mărimii diametrului găurii de sondă influențează într-o măsură redusă măsurătorile. Eroarea depinde de apropierea sau depărtarea dintre dispozitiv și peretele găurii de sondă. Principala sursă de erori o reprezintă neomogenitatea peretelui găurii de sondă după tratarea fluidului de foraj cu aditivi pentru îngreuiere sau ușurare, sau variația grosimii turtei de noroi. Prezența cavernelor, în special a microcavernelor, împiedică contactul cu pereții găurii de sondă. Abacele pentru determinarea porozității după diagrafii gama-gama permit efectuarea corecției datorită influenței diametrului găurii de sondă (v, fig. XI.4).

Influența grosimii turtei de noroi. Grosimea turtei de noroi influențează măsurătorile, în sensul că pe măsură ce grosimea turtei crește se vor înregistra anomalii cu amplitudini fictiv mărite și aceasta se reflectă prin obținerea unor valori de porozitate mărite. Dispozitivele actuale sînt astfel construite, încît pentru o grosime a turtei mai mică de 1/4 in măsurătorile sînt puțin influențate. Pentru corectarea influenței grosimii turtei asupra măsurătorilor s-au construit abace. În fig. XI.2 este prezen-

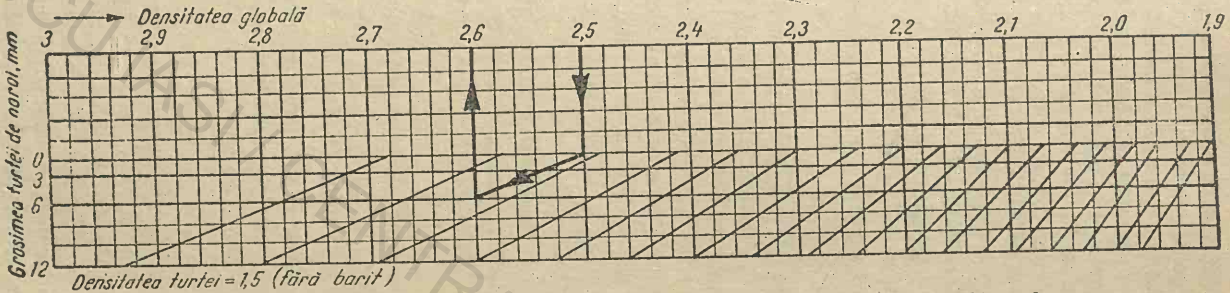


Fig. XI.2. Abacă pentru corectarea influenței grosimii turtei de noroi [Schlumberger].

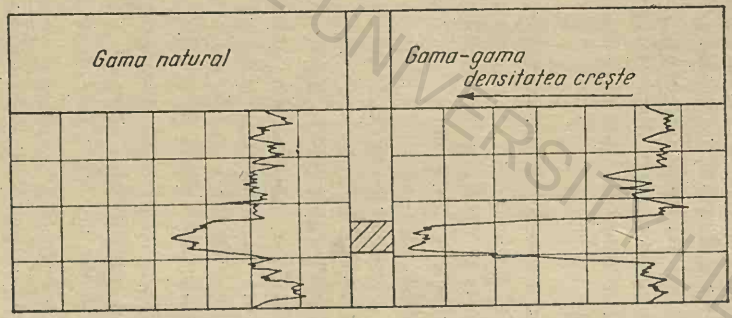


Fig. XI.3. Diagrafie γγ înregistrată în dreptul unui zăcământ de minereu de fier.

BCU CLUJ / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

tată o astfel de abacă, al cărei mod de utilizare este redat printr-un exemplu. Se cunoaşte grosimea turtei de noroi egală cu 6 mm, iar densitatea globală aparentă citită pe diagrafia gama-gama este de 2,5 kg/dm³. Din punctul notat cu 2,5 de la partea superioară a abacei se trasează verticala pînă intersectează orizontala trasată prin punctul notat în ordonată cu *O*. În continuare, se trasează o dreaptă înclinată (mai mult sau mai puţin paralelă cu dreptele înclinate ale abacei) pînă intersectează orizontală trasată prin punctul notat cu 6 de pe ordonata abacei. Din acest punct se ridică verticala şi la partea superioară a abacei se citeşte valoarea densităţii globale corectate, egală cu 2,6 kg/dm³.

Influenţele stratelor adiacente (ρ_{ad}) şi a grosimii stratului *h* se neglijează deoarece lungimea dispozitivului este redusă (30 cm).

Influenţa zonei de invadare asupra măsurătorilor este de asemenea neglijabilă.

Influenţa vitezei de înregistrare. Viteza optimă de înregistrare trebuie să fie astfel aleasă încît grosimea de strat analizată să fie traversată într-un interval de timp mai mare de două, trei ori decît constanta de timp, deoarece pentru exactitatea măsurătorilor este necesar a se înregistra minimum 95% din radiaţiile gama retroîmprăştiate prin efect Compton. Viteza de înregistrare trebuie să fie redusă şi pentru a se asigura un contact cît mai bun între aparat şi peretele găurii de sondă. Obişnuit, această viteză este de 360 m/h sau mai puţin.

Pe diagrafiile gama-gama, împreună cu diagrafiile gama natural, neutron-gama şi diagrafiile clasice de rezistivitate, se poate stabili natura unor substanţe minerale utile existente într-o succesiune de strate străbătute de găuri de sondă.

Cărbunii minerali sînt reprezentaţi pe diagrafiile gama-gama prin anomalii cu amplitudini crescute în comparaţie cu a rocilor din culcuş şi acoperiş deoarece, obişnuit, au densitate mai mică (v. fig. IX.10).

Minereurile de fier, minereurile auroargintifere şi sulfurile complexe sînt reprezentate pe diagrafiile gama-gama prin anomalii cu amplitudini reduse în comparaţie cu ale rocilor adiacente deoarece, obişnuit, au densitate mai mare decît acestea (v. fig.XI.3).

Detectarea *stratelor cu gaze* pe diagrafia gama-gama este posibilă, cînd porii rocilor sînt saturaţi cu gaze în loc de apă, deoarece în acest caz densitatea globală a rocii scade considerabil (v. tabelul 6). Formaţiunile gazeifere se recunosc pe diagrafiile gama-gama prin anomalii cu amplitudini mai mari decît ale rocilor adiacente, cu condiţia ca zona de invadare să fie mai mică decît raza de investigare a dispozitivului.

1.3. Determinarea porozității rocilor

Între porozitatea și densitatea rocilor există o dependență liniară dată de relația

$$\delta_g = (1-\varnothing)\delta_m + \varnothing\,\delta_f, \qquad \text{(XI.2)}$$

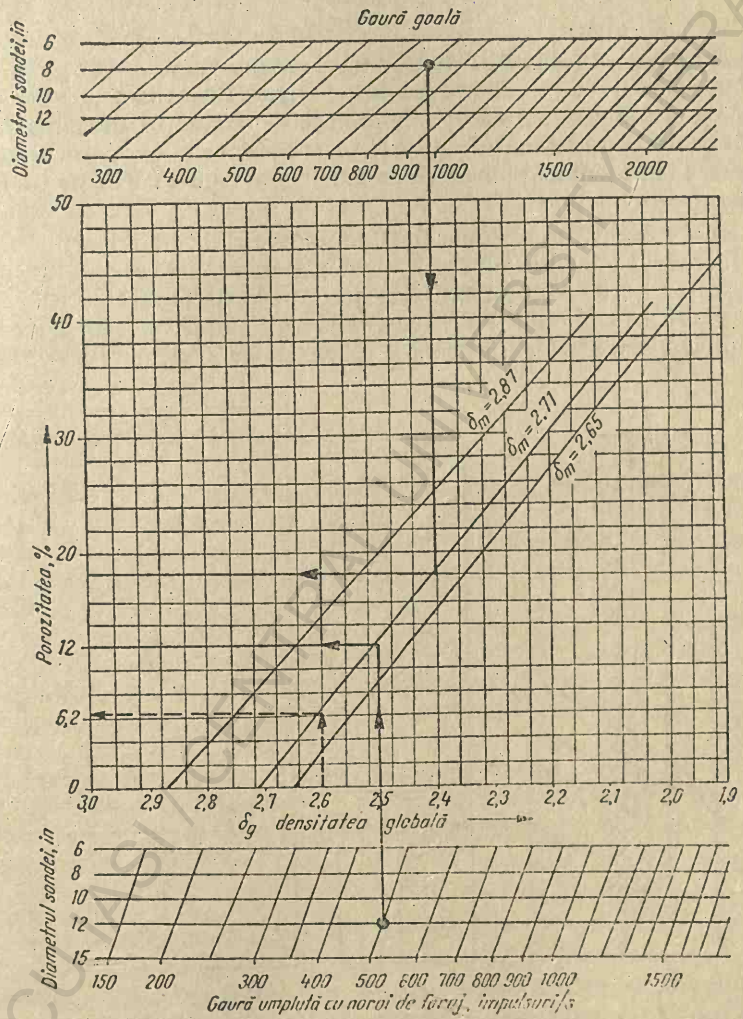


Fig. XI.4. Abacă pentru determinarea porozității rocilor. Dispozitiv γγ.

în care δ_g este densitatea globală; ø — porozitatea; δ_m — densitatea matricei; δ_f — densitatea fluidului care saturează porii rocilor (obișnuit sînt saturați cu filtrat în zona în care se face măsurătoarea).

Din relația 2 se poate deduce porozitatea ∅:

$$\varnothing = \frac{\delta_m - \delta_g}{\delta_m - \delta_f} \qquad \text{(XI.3)}$$

Determinarea porozității după curbele gama-gama se face expeditiv, utilizînd abace de genul celei prezentate în fig. XI.4. Abaca este construită pentru determinarea porozității în funcție de numărul de impulsuri pe secundă și de tipul fluidului de foraj (aer sau noroi), cu posibilitatea de corectare a influenței diametrului găurii de sondă (Turta de noroi s-a considerat=0).

Exemplu de utilizare a abacei. Date: numărul de impulsuri=500 imp/min; diametrul găurii sondei=12 in; densitatea matricei= 2,71 kg/dm³; se forează cu noroi. Din punctul în care orizontala notată cu 12 in intersectează dreapta înclinată ce reprezintă 500 imp/s, se ridică verticala pînă intersectează linia oblică δ_m=2,71 și, în contiunare, se trasează

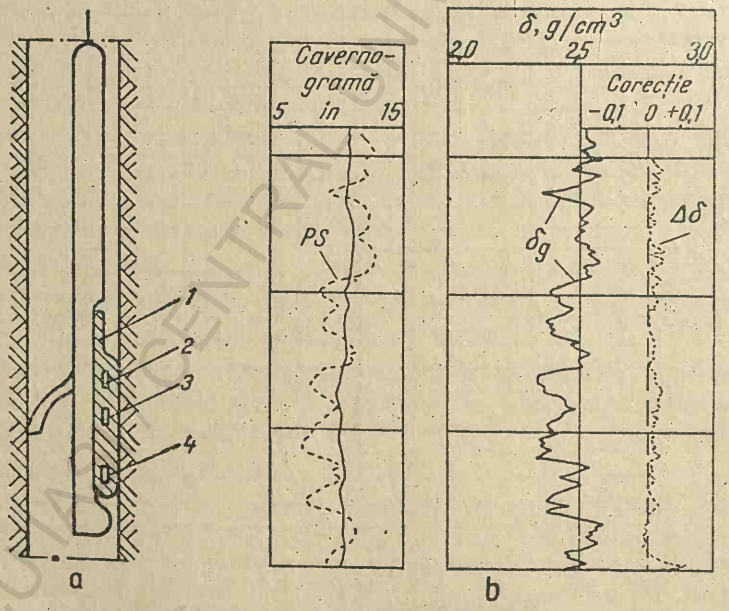


Fig. XI.5. *a* — Dispozitiv γγ de densitate compensat; *b* — Diagrafie γγ de densitate compensată.

orizontala (înspre stînga) și se citește pe ordonată o porozitate egală cu 12%. Pe abscisa abacei se citește o densitate globală aparentă egală cu 2,5 kg/dm³. În vederea obținerii densității reale, respectiv a porozității reale, se folosește abaca din fig. XI.2. Pentru o turtă groasă de 6 mm, avînd densitatea de 2,5 kg/cm³ se obține densitatea reală = 2,6 kg/dm³, de unde o porozitate corectată = 6,2%.

Diagrafia de densitate compensată (F.D.C.). Pentru determinarea densității globale, Schlumberger a construit un dispozitiv gama-gama prevăzut cu un sistem de compensare automată a variației diametrului găurii sondei și a grosimii turtei de noroi (v. fig. XI.5 *a*).

Dispozitivul are doi detectori, situați la distanțe diferite de sursa de radiații gama (Co^{60}). Detectorii sînt influențați în mod diferit de variațiile diametrului găurii de sondă, de grosimea turtei și de natura fluidelor. Se compară semnalele emise de cei doi detectori și se stabilește automat o corecție $\Delta\delta$, care se înregistrează sub formă de curbă. Totodată se corectează mărimea semnalelor detectorului celui mai îndepărtat, obținîndu-se astfel densitatea globală compensată (δ_g), care este înregistrată direct sub formă de diagramă, după cum se poate vedea în fig. XI.5 *b*.

1.4. Domeniul de aplicabilitate

Diagrafia gama-gama se folosește pentru determinarea densității rocilor. În felul acesta se pot detecta o serie de roci utile și minereuri, dacă densitatea lor este diferită de a rocilor din culcușul și din acoperișul stratului. Astfel, se pot detecta cărbunii minerali, minereurile auro-argentifere, sulfurile complexe și altele.

De asemenea se pot detecta stratele de gaze, deoarece densitatea globală a acestora comparativ cu a stratelor acvifere este mai mică.

Diagrafiile gama-gama, deși inițial au fost concepute pentru determinarea densității rocilor, în prezent se folosesc la determinarea porozității acestora.

Diagrafiile gama-gama se utilizează și la determinarea limitei dintre două fluide de densități diferite, de exemplu, limita gaze-apă.

Date suplimentare despre diagrafia gama-gama se pot găsi în cărțile de specialitate [2, 3, 4].

2. DIAGRAFIA GAMA-GAMA SELECTIV

Principiul acestei metode se fundamentează fizic pe bombardarea substanței cu radiații gama a căror energie este sub 0,6 MeV, caz în care, de regulă, se smulge un electron din stratul învecinat cu nucleul atomu-

lui iradiat. În acest proces, fotonul incident de radiație gama este absorbit și se obține un fotoelectron, care, părăsind atomul, are o energie E_e, a cărei valoare este dată de relația

$$E_e = h\nu - E_{leg} \qquad \text{(XI.4)}$$

în care: $h\nu$ este energia cuantei gama care a provocat smulgerea electronului, iar E_{leg} — energia de legătură a electronului care a fost smuls.

Ca surse de radiații gama se folosesc următorii izotopi: Se^{75}, care emite radiații gama a căror energie este 0,268 MeV și Cs^{135}, a căror energie este 0,662 MeV etc.

Dispozitivul de măsură este, în linii generale, asemănător cu un dispozitiv utilizat pentru detectarea radiațiilor gama de captură, cu deosebirea că sursa de radiații este pentru cuante gama moi (Cs^{135} sau Se^{75}). iar carcasa din dreptul contorului este subțire și formată din materiale cu număr atomic redus, aluminiu sau materiale plastice (materiale în care nu au loc efecte fotoelectrice).

Prin bombardare cu un fascicul de radiații gama de energie joasă, substanțele cu număr atomic mare, ca urmare a efectului fotoelectric, absorb o mare parte din radiațiile gama incidente, iar la detector vor sosi un număr redus de radiații gama moi. Astfel, pe curba gama-gama selectiv, elementele cu număr atomic mare vor fi evidențiate prin anomalii cu amplitudini reduse. Ca urmare, diagrafiile gama-gama selectiv se utilizează pentru detectarea substanțelor cu număr atomic mare.

3. DIAGRAFIA GAMA-NEUTRON

Această metodă se fundamentează fizic pe bombardarea unor elemente grele cu radiații gama de joasă energie. Elementele emit neutroni, după cum rezultă din următoarele reacții:

$$Be_4^9 + \gamma \rightarrow Be_4^8 + n_0^1; \quad P_{15}^{31} + \gamma \rightarrow P_{15}^{30} + n_0^1 \qquad \text{(XI.5)}$$

Dispozitivul de măsură are o sursă de radiații gama de joasă energie și un detector pentru neutroni. Pentru detectarea beriliului, sursa de radiații este Sb_{51}^{124} având o intensitate de 50—60 mCi. Măsurătorile se fac prin stații de circa 5 min/stație.

Formațiunile conținînd beriliu se recunosc pe diagrafia gama-neutron prin anomalii cu amplitudini crescute față de anomaliile de pe curba de referință de tipul neutron-neutron.

4. DIAGRAFII OBȚINUTE CU RADIAȚII X

Metodele de investigare utilizînd radiații X nu sînt metode nucleare: tratarea lor în cadrul acestui capitol este motivată de similitudinea dintre radiațiile gama și radiațiile X.

Obținerea radiațiilor X are loc ca urmare a dezintegrării substanțelor prin captura K:

$$X_Z^A + e^- \rightarrow X'^A_{Z-1} \qquad (XI.6)$$

Captura K este însoțită de emisiune de radiații X, datorită restructurării învelișului electronic.

Legea atenuării unui fascicul monocromatic de intensitate I_0 avînd coeficienți liniari de absorbție μ și difuzie σ, traversînd un mediu de grosime X este

$$I = I_0 e^{-(\mu+\sigma)X} = I_0 e^{-\tau X} \qquad (XI.7)$$

unde $\tau = \mu + \sigma$ reprezintă coeficientul total de atenuare.

Atenuarea radiațiilor X dure este urmarea efectului Compton. În direcția razelor incidente, difuzia σ este practic nulă și, ca urmare, se consideră coeficientul total de atenuare τ egal cu coeficientul de absorbție μ; deci, în direcția razelor incidente se poate considera $\tau = \mu$.

4.1. Diagrafia fluorescenței X

Fluorescența X reprezintă radiațiile emise de o substanță cînd aceasta este bombardată cu radiații X dure avînd energii de ordinul a 100 keV. Ca urmare a bombardării cu asemenea radiații X, elementele respective emit radiații a căror energie este specifică elementului bombardat (v. tabelul 8). Întrucît energia radiațiilor rezultate este de numai cîțiva keV, acestea sînt absorbite de substanțele traversate și grosimea de absorbție medie (care reprezintă distanța la sfîrșitul căreia au fost absorbite jumă-

Tabelul 8

Energia radiațiilor unor elemente activate prin bombardare cu radiații X

Element	Energia radiațiilor emise, keV	Element	Energia radiațiilor emise, keV
Oxigen	0,523	Sulf	2,308
Sodiu	1,041	Clor	2,622
Magneziu	1,254	Calciu	3,690
Aluminiu	1,487	Fier	6,40
Siliciu	1,740		

tate din radiațiile rezultante) este de ordinul milimetrilor. Deci, un dispozitiv bazat pe fluorescența X trebuie să fie presat pe peretele găurii sondei (pentru a se îndepărta turta de noroi). Dispozitivul pentru fluorescența X este în curs de experimentare în laborator.

4.2. Diagrafia difuziei X

Difuzia radiațiilor X este urmarea efectului Compton, cînd energia acestora este cuprinsă între 30 keV<E<60 keV și au lungimi de undă cuprinse între 0,2 Å<λ<0,4 Å. În diagrafia difuziei X se studiază radia-

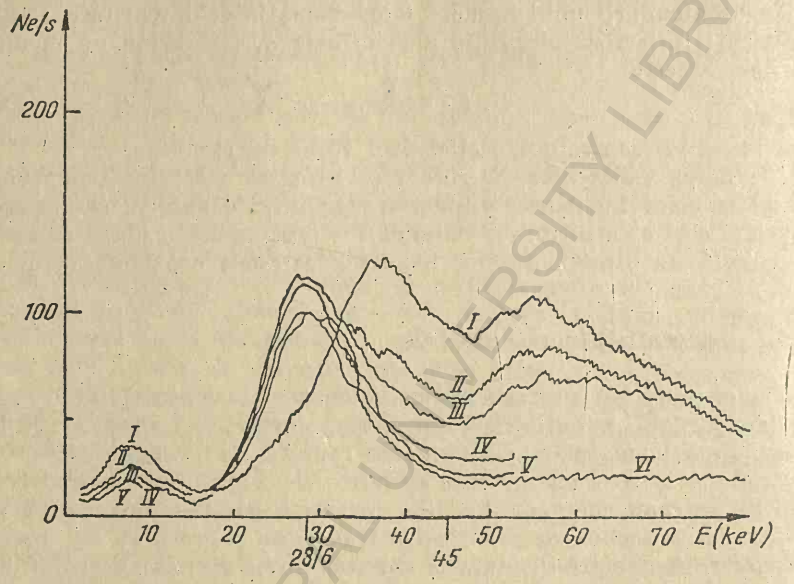


Fig. XI.6. Spectre de emisiune secundară (difuzia radiațiilor X) ale unui mediu poros saturat cu soluție de KI de diferite concentrații [5]: *I* — nisip curat; *II* — nisip + soluție de KI—70 g/l; *III* — nisip + soluție de KI 137 g/l; *IV* — nisip + soluție de KI 300 g/l; *V* — nisip + soluție de KI 500 g/l; *VI* — nisip + soluie de KI 1 100 g/l.

țiile difuzate prin efect Compton la 90°.

Sursa folosită este formată din elementul β^- activ (prometheum 147) și dintr-o țintă de oxid de samarium 153 (Sm_2O_3). Sursa β^- activă (prometheum 147) prezintă avantajul că prin dezintegrare emite numai radiații beta a căror energie este 0,223 MeV. Timpul de înjumătățire este de 2,6 ani.

G. Norel a obținut, cu o sursă samarium-prometheum, spectre de emisie secundare cînd a bombardat cu radiații X primare medii poroase saturate cu soluții de KI, avînd diferite concentrații, după cum este indicat în fig. XI.6 [5].

4.3. Diagrafia difracției X

Cînd se iradiază un solid cristalin cu radiații X, atomii rețelei produc difracția acestor radiații după unghiuri caracteristice atomilor. Plecînd de la acest principiu, s-a imaginat construirea unui dispozitiv de măsură

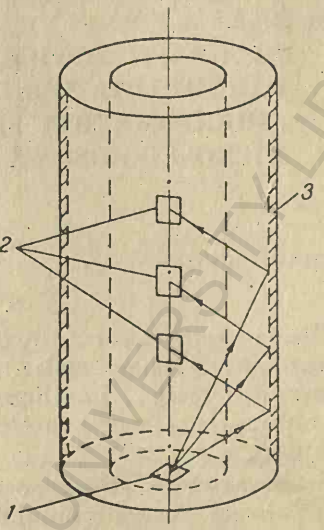


Fig. XI.7. Schema principială pentru detectarea radiațiilor X difractate.

care să fie presat pe peretele găurii de sondă, astfel ca turta de noroi să fie înlăturată și să se bombardeze formațiunile cu un fascicul de radiații X monocromatic. Detectarea radiațiilor X difractate se realizează cu contoare așezate la diverse unghiuri și în felul acesta este posibilă evidențierea diverselor roci ca, de exemplu: calcare, dolomite, silice etc. În fig. XI.7 se prezintă schema de principiu a dispozitivului pentru detectarea radiațiilor X difractate (dispozitivul este în curs de experimentare în laborator).

BIBLIOGRAFIE

1. Desbrandes, R. **Correspondance avec l'Engineering de Schlumberger Well Surveying Corporation-Houston, 1950.**
2. Alger, R. A. ș.a. **Formation Density Log Application in Liquid-Filled Holes.** J. Of. Petr. Mart., 1963.
3. Wahl, J. S. et al. **The Dual Spacing Formation Density Log.** Papier S.P.E. 989, AIME meeting, oct. 1964.
4. Tittman, J., Wahl, J. D. **The Physical Foundations of formation Density Logging (Gamma-Gamma).** Geophysics, vol. XXX, nr. 2, april. 1965.
5. Norel, G. **Application des rayons X a la mesure des porosites et des saturations dans le milieux poreux.** Revue de l'Institute Français du petrole, 1966, nr. 2.

CAPITOLUL XII

DIAGRAFII SONICE, PARAMETRII SEMNALULUI ACUSTIC. CIMENTOMETRIA ŞI DIAGRAFIA MICROSEISMOSONICA

1. DIAGRAFII SONICE

Diagrafiile sonice au fost utilizate iniţial ca elemente ajutătoare pentru interpretarea seismogramelor. Ulterior s-au utilizat pentru determinarea porozităţii rocilor, stabilirea profilelor geologice, diferenţierea stratelor cu hidrocarburi de cele acvifere şi pentru obţinerea de informaţii asupra saturaţiei.

Determinarea vitezelor de propagare a undelor elastice produse de explozii în sonde era efectuată cu ajutorul geofonilor. Astfel de măsurători, efectuate încă cu 35 de ani în urmă, au fost denumite „carotaje seismice".

Principiul acestor măsurători constă în introducerea unui geofon la o adîncime determinată în gaura de sondă cu un cablu electric, producerea unei explozii la suprafaţă şi măsurarea timpului necesar ca undele elastice provocate de explozie să ajungă la geofon. Operaţia se repetă la diverse adîncimi (de jos în sus). În felul acesta este posibil a se trasa curba timpului de propagare a undelor elastice prin diverse formaţiuni, în funcţie de distanţa parcursă. Metoda se mai utilizează şi astăzi pentru compararea cu măsurătorile seismice de suprafaţă şi mai ales pentru a determina discontinuităţile structurale de adîncime.

Plecîndu-se de la principiul acestei metode s-a ajuns la ideea să se măsoare continuu viteza de propagare a undelor elastice în gaura de sondă. Procedeul pentru măsurarea continuă a vitezei de propagare a undelor elastice în lungul găurii de sondă s-a pus la punct în 1950, iar primele măsurători s-au făcut în anul 1952 de către „Magnolia Petroleum Company" [1, 2].

În România, primele măsurători de carotaje seismice s-au făcut în anul 1953, iar primele diagrafii sonice s-au înregistrat în anul 1966.

1.1. Natura semnalelor acustice

Un semnal acustic este de fapt un teren de unde ce rezultă o dată cu emisia unei energii acustice (v. fig. XII.1).

Energia acustică provoacă în mediul înconjurător un dezechilibru de scurtă durată. Dezechilibrul este de natură fizico-dinamică și constă

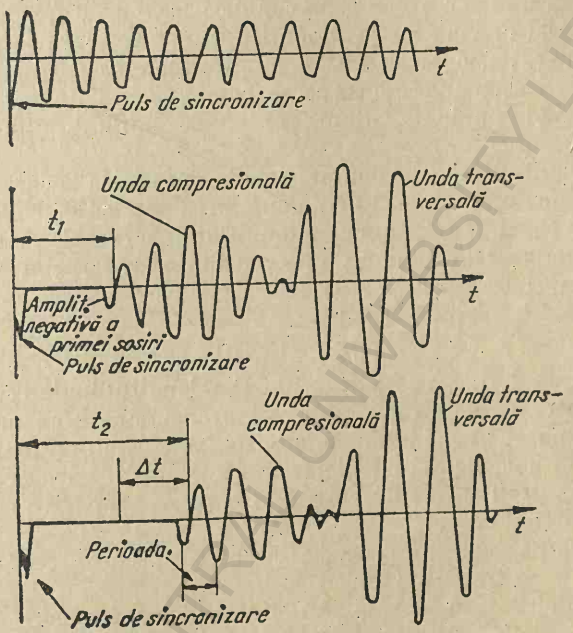


Fig. XII.1. Trenul de unde complet a unui semnal acustic.

în comprimări și dilatări succesive de scurtă durată, care conduc la transferarea (transportul) energiei acustice mediului învecinat. Procesul propagării succesive a deformărilor elastice prin mediu poartă denumirea de *undă elastică*. Linia în lungul căreia se produce propagarea undei se numește *rază*.

Energia acustică depinde de mișcarea particulelor și de aceea nu poate fi transmisă în vid. În gaze, transportul energiei acustice este redus.

Trenul de unde generat de energia acustică este de scurtă durată (20—30 μs) și se compune din mai multe genuri de unde elastice având caracteristici diferite. Caracterul diferit al undelor elastice este determinat de modul de mișcare a particulelor mediului elastic omogen și izotrop.

Teoria elasticității arată că într-un asemenea mediu se pot transmite două tipuri de unde elastice, longitudinale și transversale, avînd viteze diferite, care, propagîndu-se în interiorul Pămîntului, au căpătat denumirea de *unde de volum*. De asemenea, conform acestei teorii, prezența limitelor de separație în mediu elastic conduce la apariția undelor reflectate, a undelor penetrante, a undelor refractate longitudinale și transversale, unde care sînt încadrate tot în categoria undelor de volum.

Propagarea undelor neomogene conduce însă și la apariția unor unde cu caracteristici cinematice și dinamice deosebite, care se propagă pe o limită de separație, care au fost denumite *unde de suprafață* [4].

Deci, un tren de unde acustice se compune din unde longitudinale, unde transversale (unde de volum) și unde de suprafață (cînd apar limite de separație).

Undele longitudinale sau compresionale sînt acelea la care transmiterea energiei acustice se realizează prin deplasarea particulelor mediului paralel cu traseul razei. Viteza undelor longitudinale (viteza de compresiune) depinde de modulul lui Young E^*, de constanta lui Poisson σ^{**} și de densitatea mediului δ:

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \qquad \text{(XII.1)}$$

Din expresia 1 reiese că viteza undelor longitudinale este proporțională cu creșterea elasticității și invers proporțională cu creșterea densității. Ca urmare, viteza undelor longitudinale este mai mare în mediile solide decît în cele lichide și foarte mică în medii gazoase.

Undele longitudinale sînt singurele care se propagă prin lichide și au viteza cea mai mare.

Undele transversale sînt acelea la care mișcarea particulelor este perpendiculară pe traseul razei.

Viteza undelor transversale se definește prin relația:

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{2\,\delta(1+\sigma)}} \qquad \text{(XII.2)}$$

---

* Modulul lui Young E sau modulul elasticității este exprimat prin relația:

$$E = \frac{F \cdot L}{S \cdot dL}$$

în care F este forța, în kg; S — secțiunea, în mm²; L — lungimea, în mm; ΔL — alungirea în mm.

** Constanta lui Poisson (σ) este exprimată prin relația:

$$\sigma = \frac{dl \cdot L}{l \cdot dL}$$

în care l este dimensiunea transversală și L dimensiunea longitudinală. Constanta lui Poisson este de același ordin de mărime atît pentru metale cît și pentru roci și variază între 0,25 și 0,34.

Avînd în vedere că pentru majoritatea rocilor valoarea constantei lui Poisson (σ) este egală cu 0,25 se poate considera că

$$\frac{v_l}{v_t} = 1{,}70. \qquad \text{(XII.3)}$$

În roci, viteza undelor longitudinale variază obișnuit de la 1 530—8 000 m/s, iar vitezele transversale de la 1 000—4 000 m/s. Undele transversale nu se transmit prin lichide, ci numai prin medii solide. Energia acestor unde se transmite prin lichide sub formă de unde longitudinale secundare [3, 4, 5].

Nivelul energiei transmise sub formă de unde transversale în formațiune este, în general, de 5 pînă la 10 ori mai mare decît nivelul energiei transmisă în formațiune sub formă de unde longitudinale [3].

Undele de suprafață sînt unde la care mișcarea particulelor se efectuează cînd paralel, cînd perpendicular pe direcția razei.

Ca și undele transversale, undele de suprafață nu se transmit prin fluide; energia lor se transmite prin fluide sub formă de unde longitudinale secundare. Viteza undelor de suprafață este apropiată de aceea a undelor transversale. Mărimea energiei transmisă de undele de suprafață este inferioară mărimii energiei transmise de unde transversale. Undele de suprafață joacă un rol mai puțin important în investigările sonice.

1.2. Principiul metodei, dispozitive și scheme principiale de măsură

Măsurarea parametrilor acustici ai rocilor se face cu dispozitive special construite, lansabile în găurile de sondă cu cabluri electrice. Principial, aceste dispozitive emit impulsuri de frecvența ultrasunetelor, care, după ce se propagă prin formațiunile geologice, unde suferă o serie de alterări (atenuări și distorsionări), sînt recepționate de dispozitiv, amplificate și transmise, prin cablu, la aparatura de suprafață, unde, în final, sînt înregistrate pe o hîrtie fotosensibilă sub formă de diagramă.

Dispozitivele de măsură utilizate în investigările sonice diferă între ele după numărul generatorilor și receptorilor: Curent se folosesc următoarele dispozitive:

— dispozitive cu un generator și un receptor;
— dispozitive cu un generator și doi receptori;
— dispozitive cu un generator și trei receptori.

În ultimul timp se folosesc dispozitive cu doi generatori și patru receptori (construite de firma Schlumberger).

Generatorul magnetostrictiv se bazează pe faptul că sub acțiunea unui cîmp magnetic corpurile feromagnetice își modifică dimensiunile.

Într-un cîmp magnetic alternativ, o bară sau un tub feromagnetic se lungește și se scurtează periodic; se produc, deci, vibrații longitudinale. În cazul unei bare nemagnetizate în prealabil, frecvența vibrațiilor este egală cu dublul frecvenței curentului alternativ care creează cîmpul magnetic. Amplitudinea vibrațiilor este maximă cînd frecvența cîmpului este egală cu frecvența proprie a barei. Frecvențele proprii de rezonanță ale barelor sînt date de expresia

$$f = \frac{n}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad \text{(XII.4)}$$

în care n este un coeficient cu valori de 1, 2, 3... ; l — lungimea barei în cm; E — modulul de elasticitate, în dyne/cm²; ρ — densitatea materialului, în g/cm³.

Semnalele acustice emise de generatori au o frecvență de 20 pînă la 30 kHz și o durată de 2μs; ele se propagă în toate direcțiile, repetîndu-se de 20—50 ori pe secundă; (în funcție de tipul constructiv).

Receptorul semnalelor acustice este tot magnetostrictiv. Un receptor magnetostrictiv funcționează, dacă s-ar putea spune, invers ca un generator, în sensul că o bară feromagnetică supusă unui efort mecanic conduce la magnetizarea acesteia. Intensitatea magnetizării barei este proporțională cu intensitatea efortului mecanic, deci impulsurile de curent ce se creează vor fi și ele proporționale cu efortul mecanic la care este supus receptorul magnetostrictiv.

Receptorii magnetostrictivi au avantajul că recepționează normal impulsurile acustice emise de generator, chiar și la temperaturi ridicate, de la 150°C la 190°C, față de receptorii piezoelectrici, care funcționează normal pînă la temperatura în jur de 50°C, distrugîndu-se la temperaturi de 70—80°C.

Caracteristicile dispozitivelor. Scara sau lungimea dispozitivului este distanța dintre generator și primul receptor și se notează cu L (fig. XII.2).

Depărtarea d este distanța care separă doi receptori activi.

Punctul de înscriere a măsurătorii și a adîncimii de referință se notează cu O și este situat după cum urmează:

— pentru dispozitivele cu un receptor la jumătatea distanței dintre generator și receptor;

— pentru dispozitivele cu doi receptori la jumătatea distanței dintre receptorii R_1R_2;

— pentru dispozitivele cu trei receptori la jumătatea distanței dintre receptorii R_1R_3.

Teoretic, punctul de înscriere a măsurătorii este situat deasupra adîncimii de referință, însă în practică cele două puncte se consideră în O.

Traiectoria semnalelor acustice. Energia produsă de generatorul magnetostrictiv G este transmisă mai întîi prin fluidul de foraj către formațiunile străbătute de gaura de sondă sub formă de unde longitudinale P_1. Anterior s-a spus că undele longitudinale (compresionale) sînt

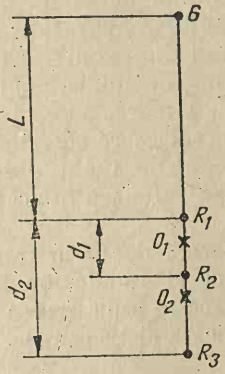


Fig. XII.2. Dispozitiv de măsură pentru investigări sonice:

R_1, R_2, R_3 — receptori; G — generator; L — lungimea dispozitivului; d_1, d_2 — depărtări; O_1, O_2 — puncte de înscriere a măsurătorii.

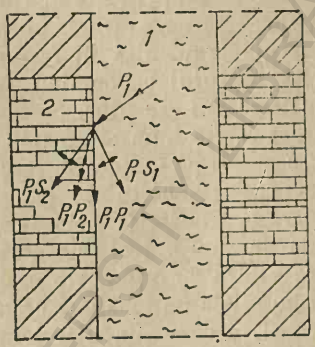


Fig. XII.3. Reprezentare schematică a propagării undei longitudinale P_1 în momentul pătrunderii în formațiune:

1 — gaura de sondă; *2* — calcare; P_1P_2 — undă longitudinală refractată; P_1S_2 — undă transversală refractată; P_1S_1 — undă transversală reflectată; P_1P_1 undă de suprafață.

singurele care se propagă în lichide. În momentul pătrunderii undelor longitudinale în formațiune, energia acustică se transmite în toate direcțiile, inclusiv în jos spre receptori.

Undele longitudinale P_1 ajungînd la suprafața de separație dintre formațiune și gaura de sondă vor fi reflectate și refractate ca în fig. XII.3, astfel:

— ca urmare a refracției propagarea energiei acustice în formațiune se face sub forma de unde longitudinale P_1P_2, unde transversale P_1S_2 și unde de suprafață P_1P_1;

— ca urmare a reflecției, propagarea energiei acustice în fluidul de foraj se face sub formă de unde longitudinale, deși unda reflectată P_1S_1 este transversală. Avînd în vedere însă că viteza de propagare a undelor acustice prin noroiul de foraj este mai mică decît a undelor care se propagă prin formațiune, acestea nu influențează măsurătorile și nu vor fi luate în considerare.

Undele refractate ajungînd la nivelul receptorului (receptorilor), energia transmisă de fiecare din cele trei tipuri de unde P_1P_2, P_1S_2 și P_1P_1 se transformă (parțial) din nou în unde longitudinale, care, traversînd noroiul de foraj, ajung la receptor (receptori).

Receptorii transformă energia mecanică într-un semnal electric. Cu cît presiunea exercitată de energia undelor acustice asupra receptorilor va fi mai mare, cu atît tensiunea generată de aceştia va fi mai mare. Receptorii pot indica astfel prezenţa şi mărimea energiei undelor acustice, însă nu fac distincţie între diferitele forme de unde. Tensiunile generate sînt amplificate şi transmise prin cablu la aparatura de suprafaţă pentru înregistrare şi observare pe ecranul unui osciloscop.

Energia transmisă în formaţiune sub formă de unde longitudinale, datorită faptului că acestea au viteza cea mai mare, soseşte prima la nivelul fiecărui receptor. Se obişnuieşte ca energia care soseşte prima la receptori să fie numită „prima sosire" din trenul de unde observat pe osciloscop sau pe fotografia (oscilograma) ce se efectuează în acel moment de pe ecranul acestuia.

Energia transmisă prin formaţiune sub formă de unde transversale şi unde de suprafaţă urmează acelaşi traseu ca şi undele longitudinale, dar are viteze de propagare mai reduse. Cînd aceste unde sosesc la receptori, semnalele de tensiune create sînt amplificate şi transmise la suprafaţă ca şi în cazul undelor longitudinale.

Se obişnuieşte ca energia undelor transversale şi de suprafaţă care soseşte la receptori după energia undelor longitudinale să fie denumită „sosire secundară". Pe ecranul osciloscopului, undele transversale şi cele de suprafaţă sînt caracterizate ca oscilaţiile cu amplitudinile cele mai mari din trenul de unde. Aceasta deoarece undele transversale, în special, au o energie de 5—10 ori mai mare decît a undelor longitudinale. Acelaşi lucru se poate spune şi despre energia undelor de suprafaţă. O delimitare precisă între cele trei categorii de unde nu se poate face întotdeauna pe oscilograme.

Caracteristicile semnalelor acustice. Principalele caracteristici ale semnalelor acustice sînt:

— frecvenţa f=20 000 Hz (frecvenţele mai ridicate conduc la creşterea ciclurilor neînregistrate);

— perioada T=50 μs;

— viteza de propagare v cuprinsă între 1 530 şi 8 200 m/s (5 000—27 000 picioare/s) în funcţie de natura rocilor şi a fluidelor care le saturează porii;

— lungimea de undă λ cuprinsă între 7,6 şi 41 cm (0,25—1,35 picioare);

— amplitudinea negativă a primei sosiri a undelor longitudinale „prima sosire" care se notează cu „e";

— amplitudinea maximă a semnalului acustic (v. fig. 1).

Timpul necesar semnalelor acustice pentru parcurgerea distanţei generator-receptor. În cazul dispozitivelor *cu un receptor*, măsurarea timpului t se face din momentul iniţierii impulsului de către generatorul G pînă

la sosirea acestuia la receptorul R. Timpul t se compune din: timpul necesar parcurgerii distanței a de la generator la formațiune, distanței b prin formațiune și distanței c de la formațiune la receptor (v. fig. XII.4). Dacă notăm viteza undelor elastice prin noroiul de foraj cu v_n și prin formațiune v_{form}, timpul t necesar parcurgerii distanței generator-receptor se calculează cu relația:

$$t=\frac{a}{v_n}+\frac{b}{v_{form}}+\frac{c}{v_n} \qquad \text{(XII.5)}$$

În cazul cînd unghiurile de refracție θ_1 și θ_2 sînt egale, atunci și distanțele a și c sînt egale și relația 5 devine:

$$t=\frac{2a}{v_n}+\frac{b}{v_{form}}; \qquad \text{(XII.6)}$$

aceasta reprezintă cazul în care diametrul găurii sondei este constant, aparatul este centrat sau se sprijină după o generatoare pe peretele găurii [6, 7].

În cazul dispozitivelor cu un singur receptor intervine o eroare ε în măsurarea timpului parcurs de semnalele acustice prin formațiune și anume:

1) cînd diametrul găurii de sondă variază

$$\varepsilon_1=\frac{a}{v_n}+\frac{c}{v_n} \qquad \text{(XII.7)}$$

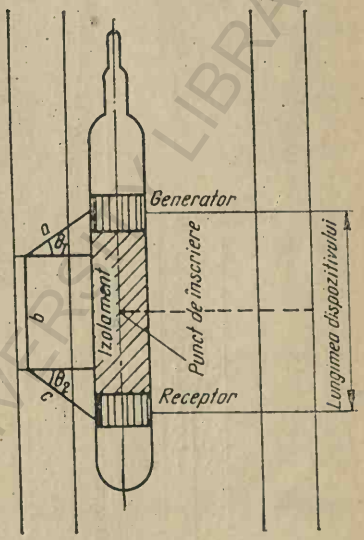


Fig. XII.4. Dispozitiv cu un receptor.

2) cînd diametrul găurii de sondă este constant:

$$\varepsilon_2=\frac{2a}{v_n} \qquad \text{(XII.8)}$$

În cazul dispozitivelor *cu doi (trei) receptori*, parametrul ce se măsoară este Δt, reprezentînd diferența dintre timpul t_2, necesar semnalului acustic să parcurgă distanța de la generatorul G la receptorul cel mai îndepărtat R_2 (R_3), respectiv traseul II compus din $a+b+d+e$, și timpul t_1 necesar aceluiași semnal ca să parcurgă distanța de la generator la receptorul apropiat R_1, respectiv traseul I compus din $a+b+c$ (v. fig. XII.5). Făcînd diferența dintre cele două trasee se obține:

$$II-I=(a+b+d+e)-(a-b+c)=d+e-c \qquad \text{(XII.9)}$$

După cum rezultă din fig. XII.5 și avînd în vedere că la variații ale diametrului găurii sondei diferența $e-c$ nu are valori apreciabile,

se poate considera că distanțele e și c rămîn practic egale în timpul operației și astfel relația XII.9 devine

$$II - I = d, \qquad \text{(XII.10)}$$

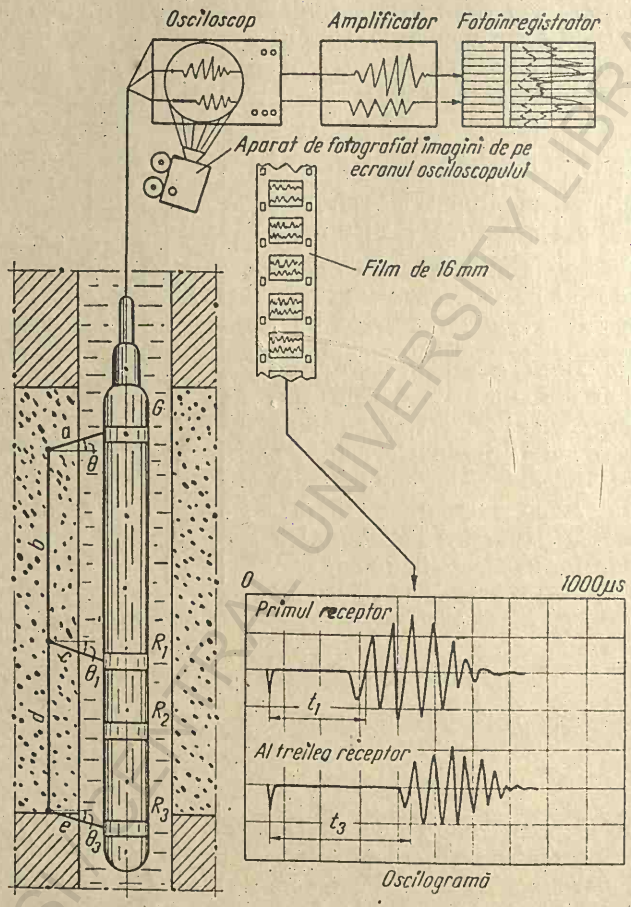


Fig. XII.5. Schema principială de înregistrare a diagrafiilor sonice și a oscilogramelor.

astfel că se măsoară numai timpul Δt parcurs de semnale acustice prin formațiune:

$$\Delta t = \frac{d}{v_{form}} \text{ [în } \mu s/m \text{ sau } \mu s/picior] \qquad \text{(XII.11)}$$

În concluzie, la dispozitivele cu doi (trei) receptori, cînd diametrul găurii de sondă nu are variaţii mari se elimină practic influenţa drumului parcurs de semnalele acustice prin noroi.

Raza de investigare a dispozitivului. Rază de investigare se numeşte extinderea laterală considerată de la peretele găurii de sondă pînă la acele porţiuni ale formaţiunii care nu mai intervin în măsurătoare. Noţiunea *rază de investigare* nu se referă neapărat la forma geometrică a volumului de rocă investigată.

În măsurătorile acustice, raza de investigare este determinată de timpul cel mai scurt parcurs de undele refractate (P_1P_2 şi P_1S_2, v. fig. XII.3) emise de generatorul G şi recepţionate de unul din receptorii dispozitivului (v. fig. XII.5).

La prima vedere există tentaţia de a presupune că traiectoria cea mai scurtă parcursă de semnalele acustice prin formaţiune este în imediata vecinătate a peretelui găurii sondei, deci că acestei traiectorii îi corespunde timpul cel mai scurt de propagare. Acest raţionament nu este greşit dar nu corespunde cu modul de propagare a undelor acustice.

Pentru stabilirea mărimii razei de investigare în diagrafia sonică se determină lungimea de undă λ a semnalelor acustice

$$\lambda = \frac{v_{form}}{f} \qquad \text{(XII.12)}$$

în care v_{form} este viteza de propagare a semnalelor acustice prin formaţiune; f — frecvenţa semnalului.

Dacă în rocile sedimentare viteza v_{form} variază între 1 530—8 200 m/s, iar frecvenţa f este obişnuit 20 000 Hz, rezultă că lungimea de undă λ variază între 7,6 şi 41 cm. Experienţele de laborator au indicat o extindere laterală de cel puţin trei lungimi de undă (3λ), pentru propagarea undelor longitudinale. Faţă de experienţele de laborator rezultă că raza de investigare în măsurătorile sonice variază între următoarele limite:

$$3\lambda = 3\,(7{,}6 \cdots 41)\ \text{cm} \approx 23\ \text{cm} \cdots 123\ \text{cm}.$$

Experienţele de laborator au fost confirmate de măsurătorile efectuate în sonde. Un exemplu elocvent că în măsurătorile sonice raza de investigare depăşeşte o lungime de undă este determinarea calităţii cimentării coloanelor. În cazul cînd inelul de ciment aderă atît de coloană cît şi de teren, se măsoară viteza de propagare a semnalelor acustice în teren, chiar în zonele cu caverne, în dreptul cărora diametrul depăşeşte 40 cm.

Raza de investigare depinde nu numai de lungimea de undă a undelor acustice (respectiv de viteza de propagare şi frecvenţa acestora) ci şi de lungimea L şi depărtarea d a dispozitivului de măsură.

Exemplu: În nisipurile gazeifere viteza de propagare a semnalelor acustice este mai redusă decît în nisipurile acvifere, ambele nisipuri avînd aceeași porozitate. Dacă zona de invadare este mare, se va măsura o viteză de propagare a semnalelor acustice caracteristică nisipurilor acvifere. Dacă zona de invadare a nisipurilor gazeifere este redusă, aceasta nu constituie un suport pentru propagarea undelor acustice și se poate înregistra viteza de propagare a acestora prin nisipurile gazeifere, cu condiția ca distanța dintre generator și receptor să fie mai mare decît raza zonei de invadare (r_{zi}). Aceasta s-a constatat cu ocazia efectuării de măsurători cu dispozitive avînd doi sau trei receptori, la care lungimea dispozitivului L a fost mai mică decît raza zonei de invadare ($L<r_{zi}$), iar distanța de la generator la al doilea sau al treilea receptor a fost mai mare decît raza zonei de invadare ($L+d_{R_1R_3}<r_{zi}$).

1.3. Interpretarea calitativă

Diagrafiile sonice sînt diagrafii de timp, deoarece reflectă variația funcției liniare:

$$t=f\left(\frac{1}{v}\right) \qquad \text{(XII.13)}$$

în care t este timpul necesar semnalului acustic să parcurgă distanța generator-receptori (în μs/m sau μs/picior), iar v — viteza semnalului acustic (în m/s sau picior/s).

După cum se înregistrează timpul parcurs de semnalele acustice de la generator la primul receptor sau între receptori se va obține, în primul caz, diagrafia sonică de timp obișnuită, iar în al doilea caz diagrafia sonică Δt; în descriere, uneori prima se va numi diagrafia sau *curba de timp*, iar a doua diagrafia sau *curba* Δt.

Prin integrarea timpului de parcurgere a semnalelor acustice în funcție de adîncime se obține diagrafia de timp integrată.

1.3.1. *Diagrafia sonică de timp obișnuită*

Această diagrafie se obține prin măsurarea timpului necesar semnalelor acustice ca să parcurgă traseul generator-fluid de foraj-formațiune-fluid de foraj-receptor și raportarea timpului obținut la lungimea dispozitivului. Referindu-ne la fig. XII.4, traseul menționat se obține prin însumarea distanțelor $a+b+c$. În felul acesta, pe diagrafiile sonice de timp obișnuite se măsoară timpul parcurs de semnalele acustice pe unitatea de lungime în μs/m sau μs/picior, după cum rezultă și din relația

$$t=\frac{T}{L}\ [\text{în } \mu\text{s/m sau } \mu\text{s/picior}], \qquad \text{(XII.14)}$$

în care T este timpul total în μs.

În fig. XII.6 este prezentată o diagrafie sonică de timp obișnuită, notată cu *1*. Timpul crește de la dreapta spre stînga. Vîrfurile curbei al

căror sens este de la stînga spre dreapta reprezintă roci prin care semnalele acustice se propagă cu viteză mare (gresii compacte, calcare, dolo-

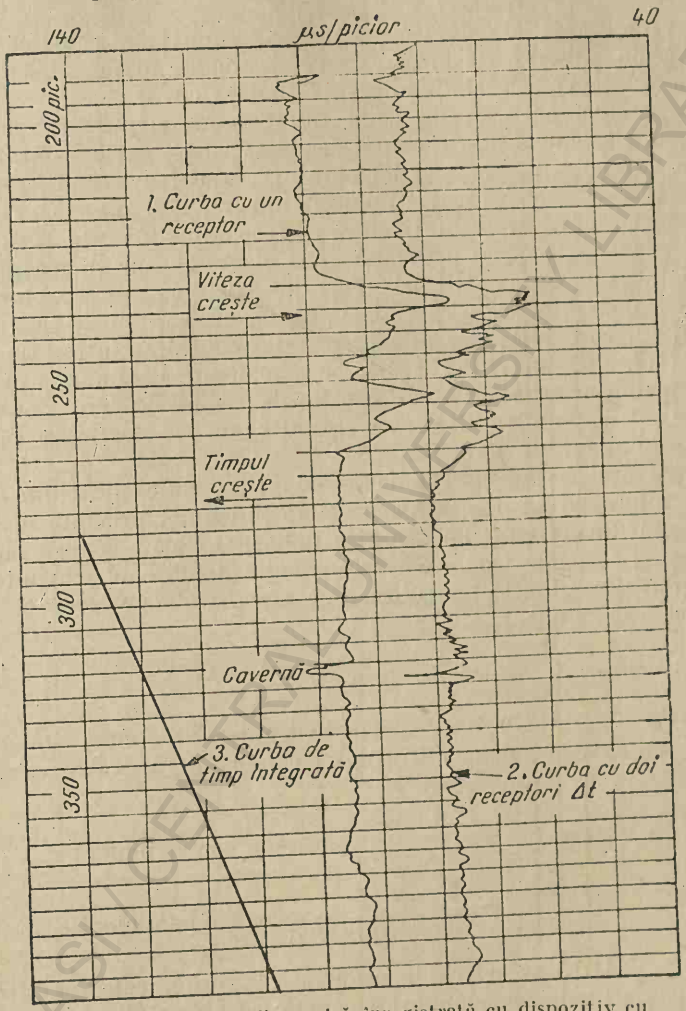


Fig. XII.6. Diagrafie sonică înregistrată cu dispozitiv cu doi receptori.

mite etc.), iar vîrfurile al căror sens este de la dreapta spre stînga reprezintă roci prin care semnalele acustice se propagă cu viteză medie sau redusă (argile, nisipuri consolidate şi neconsolidate etc.).

1.3.2. *Diagrafia sonică de timp integrată în funcție de adîncime*

Această diagrafie redă timpul necesar semnalelor acustice pentru a parcurge un interval din lungul găurii de sondă. În fig. XII.6 este prezentată și o curbă de timp integrată (notată cu *3*).

Din analiza curbelor de timp integrate în comparație cu seismocarotajele clasice executate pentru aceleași sonde, s-a constatat că între curbele de timp integrate și hodograful vertical există diferențe sistematice, în sensul că valorile timpului integrat sînt mai mari decît cele din seismocarotaj. După unii autori [2] aceste diferențe sînt de 40 μs pentru 1 000 m în cazul utilizării unui dispozitiv cu un receptor, și de la 5 la 15 μs în cazul utilizării unui dispozitiv cu doi receptori. Explicația dată constă în aceea că undele elastice propagîndu-se și prin fluidul de foraj (în care viteza de propagare este redusă) se introduce o eroare sistematică. Alți autori [8] explică această eroare sistematică prin anizotropia mediului stratificat, dimensiunile reduse dintre generator și receptori și, în special, dispersia vitezelor undelor elastice a căror frecvență este în jur de 20 000 Hz.

Pentru prospecțiunea seismică, diagrafiile sonice de timp obișnuite sau Δt, împreună cu diagrafiile de timp integrate, prezintă o deosebită importanță. Cu ajutorul lor se obțin date mai exacte asupra succesiunii de viteze și se poate face o corelare exactă (direct sau prin intermediul seismogramelor sintetice) a reflecțiilor înregistrate pe teren cu reperele litologice din sonde.

1.3.3. *Diagrafia sonică de timp* Δt

Această diagrafie se obține prin măsurarea diferenței timpului parcurs de semnalele acustice între doi receptori și raportarea acestuia la depărtarea d, conform relațiilor

$$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{d} \text{ sau } \frac{t_3 - t_1}{d} \text{ [în μs/m sau μs/picior]} \qquad \text{(XII.15)}$$

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{d} \text{ sau } \frac{t_1 - t_3}{d} \text{ [în μs/m sau μs/picior]} \qquad \text{(XII.16)}$$

Relația XII.15 se referă la cazurile obișnuite, cele mai frecvente, la care timpul necesar semnalului acustic să ajungă la primul receptor t_1 este mai mic decît timpul necesar semnalului să ajungă la receptorul următor, care poate fi R_2 sau R_3, respectiv decît timpul t_2 sau t_3.

Relația XII.16 se referă la cazurile mai puțin frecvente, în care timpul parcurs de semnal pînă la primul receptor t_1 este mai mare decît timpul parcurs de semnal pînă la receptorii următori R_2, R_3 respectiv

decît t_2 sau t_3. Aceste cazuri au loc cînd semnalul acustic ajunge la primul receptor R_1 prin fluidul de foraj, iar la receptorul următor $R_2(R_3)$ ajunge direct din formațiune la acesta (cazul cavernelor).

În fig. XII.6 este reprezentată o curbă de timp Δt, notată cu 2. Semnificațiile anomaliilor de pe curbă sînt aceleași ca și la curba de timp obișnuită.

Curba de timp Δt se înregistrează împreună cu profilul de timp obișnuit, din considerentele următoare:

— Există un mijloc de control asupra corectitudinii înregistrării curbei Δt. Un exemplu în acest sens este prezentat în fig. XII.7. Din observarea curbei de timp obișnuită comparativ cu curba Δt a reieșit că pe aceasta din urmă nu s-au înregistrat o serie de semnale, ceea ce a condus la o înregistrare fictivă pe porțiunea hașurată din figura menționată. Analizînd oscilogramele din dreptul acestui interval s-a putut recondiționa curba Δt din intervalul respectiv (porțiunea desenată cu

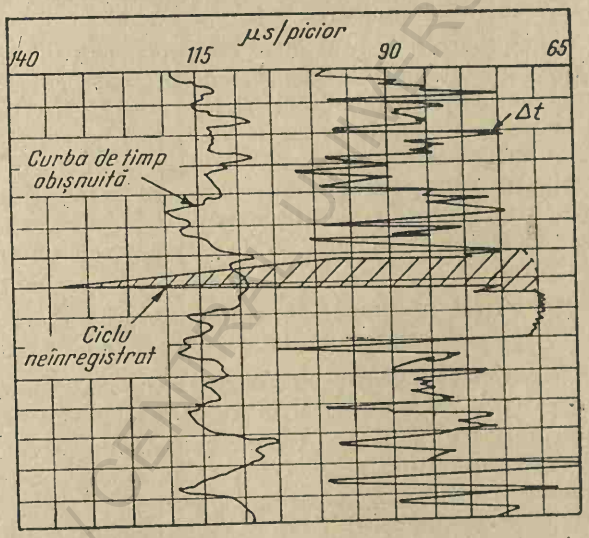


Fig. XII.7. Exemplu de înregistrare a curbei de viteză Δt avînd cicluri neînregistrate.

linii întrerupte). Cauzele care fac ca o serie de semnale acustice să nu fie înregistrate sînt descrise în XII.1.3.4.

— Pentru rocile cu viteză mare de propagare, citirile se fac pe curba de timp obișnuită, deoarece în acest caz reprezentarea este mai corectă.

— În formațiunile la care raza zonei invadate este mai mare decît lungimea dispozitivului, însă este mai mică decît lungimea dispoziti-

vului + depărtarea, se măsoară timpul de propagare a semnalelor acustice din zona necontaminată, și astfel se obține un timp de propagare apropiat de cel real prin formațiunea necontaminată.

1.3.4. *Factorii care influențează diagrafiile sonice*

Factorii geometrici ai dispozitivului. Diagrafiile sonice sînt influențate de lungimea și de depărtarea dispozitivului.

Lungimea dispozitivului L trebuie să fie suficient de mare, astfel încît la receptorul R_1 să ajungă primul semnalul acustic care se propagă prin formațiune și nu semnalul acustic care se propagă prin fluidul de foraj. Experiențele au arătat că măsurătorile efectuate cu dispozitive avînd lungimi mari au dat rezultate mai corecte însă mai puțin detaliate decît la dispozitivele cu lungimi reduse. Pe baza datelor experimentale s-a stabilit că lungimea optimă a dispozitivului este cuprinsă între 0,9 și 1,2 m (3—4 picioare).

În cazul unor *depărtări* reduse între receptori, sub 0,3 m (1 picior), curbele înregistrate sînt mult influențate de prezența cavernelor, influență care se reduce cu mărirea distanței R_1R_2, respectiv R_1R_3. Depărtarea nu poate fi mărită oricît, deoarece la depărtări prea mari semnalul acustic pierde o mare parte din energia sa și la un moment dat nu mai poate fi deosebit de semnalele parazite care sînt întotdeauna prezente. Pe baza datelor experimentale s-a ales depărtarea la dispozitivele cu doi receptori egală cu 0,3 m (1 picior), iar la dispozitivele cu trei receptori 0,9 m (3 picioare).

Factorii geometrici ai găurii de sondă. Acești factori se referă la prezența cavernelor și la mărimea diametrului găurii de sondă.

Prezența cavernelor conduce la creșterea traiectoriei semnalelor acustice de la generator la receptor, deci la mărirea timpului de propagare.

— Forma teoretică a anomaliei fictive cauzată de prezența cavernelor pe curbele de timp obișnuite (v. fig. XII.8). Anomalia fictivă apare pe curbă în momentul în care generatorul începe să traverseze caverna (poziția *1*). Din acest moment, timpul de propagare crește continuu pînă cînd și receptorul a ajuns în dreptul cavernei (poziția 3). În continuare, timpul rămîne constant, la valoarea maximă atinsă, corespunzătoare poziției *3*. Fenomenul se repetă la ieșirea dispozitivului din cavernă. Lungimea cavernei se determină prin unirea punctelor mediane B și E ale curbei. Spațiul hașurat din fig. XII.8 reprezintă timpul de propagare a semnalelor acustice prin fluidul de foraj — timpul fictiv cu care se majorează timpul real. Timpul înregistrat este suma timpului real și a timpului fictiv (prin timpul real înțelegînd timpul pentru propagarea undelor prin formațiune).

— Forma teoretică a anomaliei fictive cauzată de prezența cavernelor pe curbele Δt (v. fig. XII.9). Anomalia fictivă apare pe curbă în momentul în care receptorul R_1 începe să traverseze caverna (poziția *1*). Din acest moment, valoarea lui Δt începe să scadă continuu pînă ce punctul

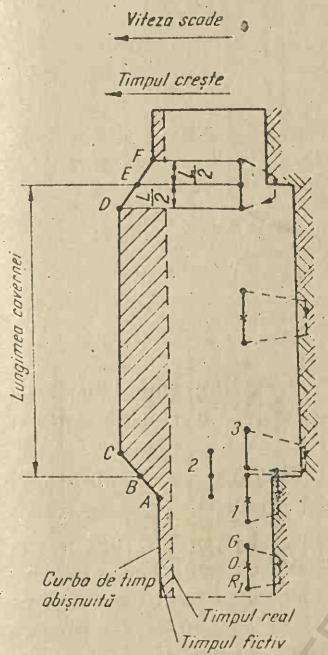


Fig. XII.8. Forma teoretică a anomaliei fictive cauzată de prezența cavernelor pe curbele de timp obișnuite [2].

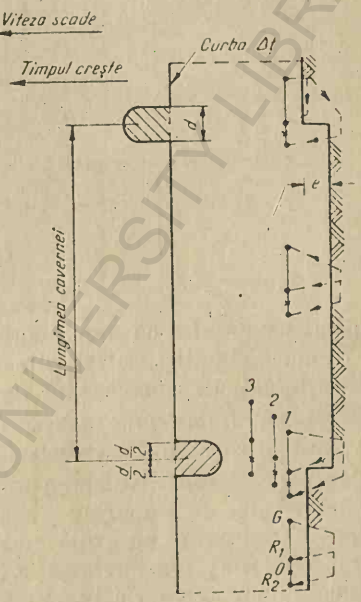


Fig. XII.9. Forma teoretică a anomaliilor fictive cauzată de prezența cavernelor pe curbele de timp Δt [2].

de înregistrare *O* al dispozitivului a ajuns în dreptul începutului cavernei (poziția *2*). Explicația scăderii lui Δt este următoarea: din momentul în care receptorul R_1 a început să traverseze caverna, timpul t_1' necesar ca undele acustice să ajungă la receptorul R_1, parcurgînd o distanță suplimentară *e*, prin fluidul de foraj depășește timpul t_2 necesar ca semnalele să ajungă la receptorul R_2 și astfel $t_1+t_1'>t_2$.

În continuare, după ce punctul de măsură *O* a intrat în cavernă, Δt crește pînă ce receptorul R_2 a intrat în cavernă. În continuare Δt nu mai este influențat de cavernă.

În partea superioară a cavernei, Δt începe să crească din momentul în care receptorul R_1 a părăsit caverna. Creșterea lui Δt continuă pînă ce

punctul de înscriere al dispozitivului O ajunge în dreptul sfîrșitului cavernei, după care Δt descrește pînă ce receptorul R_2 a ieșit din cavernă.

— Forma teoretică a anomaliei fictive pe curbele de timp obișnuite, în cazul cavernelor cu deschidere mai mică decît lungimea dispozitivului.

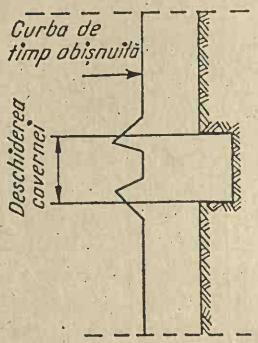


Fig. XII.10. Forma teoretică a anomaliilor fictive cauzată de prezența cavernelor pe curbele de timp Δt, cînd deschiderea acesteia este mai mică decît lungimea dispozitivului [2].

În cazul cavernelor cu deschidere mai mică decît lungimea dispozitivului, forma anomaliei fictive din dreptul acestora pe curba de timp obișnuită este ca aceea prezentată în fig. XII.10.

Mărimea diametrului găurii sondei influențează în special curbele de viteză obișnuite, cînd dispozitivul este centrat.

Centrarea dispozitivelor cu un receptor are ca rezultat reducerea fictivă a vitezelor de propagare a semnalelor acustice, deoarece acestea sînt obligate să parcurgă un drum mai mare prin noroi și deci un timp suplimentar $t=2\,a/v_n$ (vezi relația XII.8). Creșterea timpului de propagare conduce la creșterea fictivă a amplitudinilor anomaliilor curbelor de timp obișnuite în comparație cu ale curbelor Δt.

În general nu se recomandă ca dispozitivele să fie centrate cînd diametrul găurii de sondă este mare [9].

Influența geometriei stratelor. În cazul dispozitivelor cu un receptor se deosebesc două situații.

1. Strat gros. Un strat gros poate fi definit stratul a cărui grosime este mai mare decît lungimea dispozitivului. Dacă există o delimitare clară între stratul de grosime mare și stratele adiacente, atunci grosimea acestuia se determină scăzînd din punctele de inflexiune A și B ale curbei de timp distanța $L/2$ (jumătate din lungimea dispozitivului).

În fig. XII.11 *a* este prezentat cazul în care viteza stratelor adiacente v_1 este mai mică decît viteza v_2 a stratului gros, iar în fig. XII.11 *b* este prezentat cazul în care viteza v_1 a stratelor adiacente este mai mare decît viteza v_2 a stratului gros [2].

2. Strate subțiri mărginite de strate groase. Un strat subțire poate fi definit acela a cărui grosime este egală cu sau mai mică decît lungimea dispozitivului. În fig. XII.12 este reprezentat un strat a, avînd

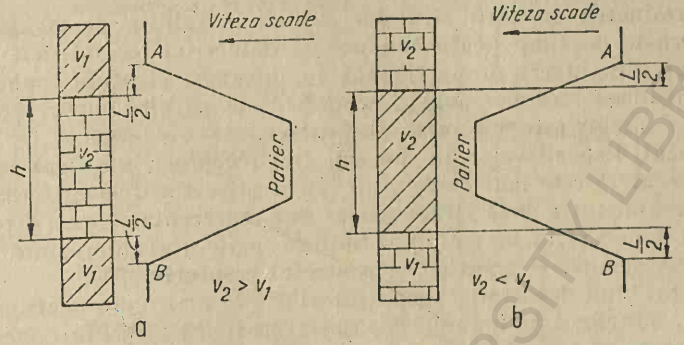


Fig. XII.11. Aspectul curbelor teoretice de timp pentru strate groase. Înregistrare cu dispozitiv avînd un singur receptor [2].

grosimea $h=L$ și palierul un punct; un strat b, avînd grosimea $h=\frac{2}{3}L$ și palierul $\frac{1}{3}L$; viteza v_1 a stratelor adiacente se consideră mai mică decît viteza v_2 a stratelor subțiri ($v_2>v_1$).

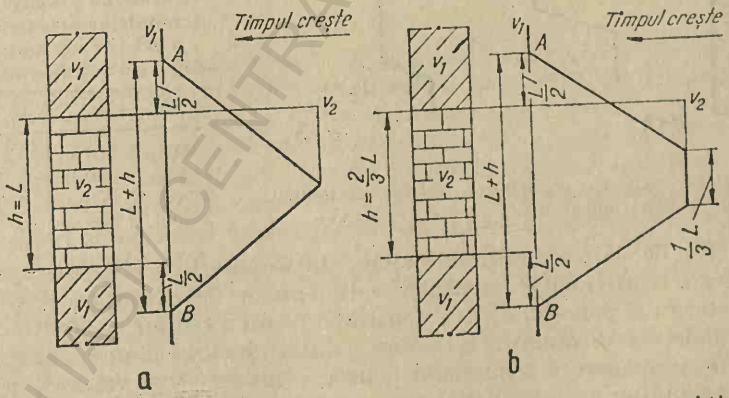


Fig. XII.12. Aspectul curbelor teoretice de timp pentru strate subțiri mărginite de strate groase. Înregistrare cu dispozitiv avînd un singur receptor [2]:

a — strat subțire, avînd $h=L$ și $v_2>v_1$; b — strat subțire avînd $h=3/2\ L$ și $v_2>v_1$.

Extinderea palierului se obține prin diferența $L-h$; astfel, pentru stratul de grosime $h=L$ palierul este un punct, iar pentru stratul de grosime $h=\frac{2}{3}L$ palierul este $\frac{1}{3}L$.

Determinarea grosimii stratelor subțiri mărginite de strate groase după curbele de timp poate conduce la date eronate, întrucît lățimea palierului este invers proporțională cu grosimea stratului subțire. De aceea, grosimea stratelor subțiri se determină pe alte curbe, în special pe curbe înregistrate cu microdispozitive.

În cazul dispozitivelor cu doi sau trei receptori, un strat subțire a cărui grosime h este mai mare decît depărtarea d a dispozitivului, cînd este intercalat între două strate groase este reprezentat simetric pe curba Δt ca în fig. XII.13 *a*, iar amplitudinea palierului reprezintă timpul parcurs de semnalele acustice prin stratul respectiv.

În cazul cînd depărtarea dispozitivului este mai mare decît grosimea stratului, lungimea palierului depășește grosimea stratului, iar amplitudinea acestuia se reduce cu raportul d/h (v. fig. XII.13 *b*).

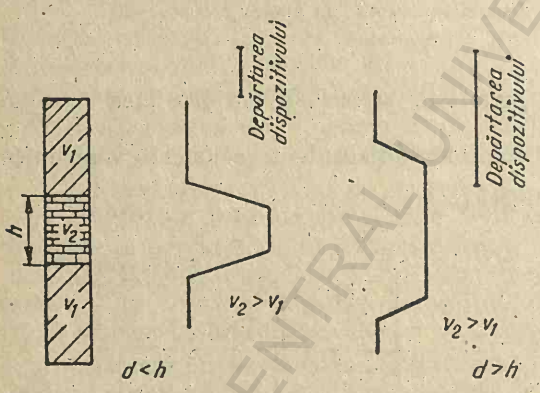


Fig. XII.13. Aspectul curbelor teoretice Δt pentru strate subțiri mărginite de strate groase [2].

Influența factorilor geologici. Presiunea, temperatura și gradul de consolidare a rocilor și alți factori influențează propagarea undelor

Tabelul 9

Vitezele de propagare a semnalelor acustice în apele de zăcămînt în funcție de adîncime [11]

Adîncimea	v_f, m/s
0—1 000 m	1 600
1 000—2 000 m	1 750
2 000—3 000 m	1 900
3 000—4 000 m	2 150

sonice. Rocile, la o anumită adîncime, sînt supuse la o presiune p_s corespunzătoare aproximativ greutății sedimentelor de deasupra. Presiunea p_s se determină prin înmulțirea densității medii a rocilor cu înălțimea H.

Fluidele, la o anumită adîncime, sînt supuse la o presiune p_f, iar viteza de propagare a semnalelor acustice într-un strat variază cu diferența presiunilor p_s-p_f. Ladefroux arată că influența factorului p_s-p_f poate conduce la o variație a vitezei de propagare a semnalelor acustice între 15—20%. Într-un strat omogen, viteza rămîne aproximativ constantă pe toată întinderea sa [11].

În tabelul 9 se redau vitezele de propagare a semnalelor acustice în apele de zăcămînt în funcție de adîncime.

Temperatura. În gresii, viteza de propagare a semnalelor acustice scade liniar cu creșterea temperaturii (fig. XII.14 *a*), iar în calcare scade după o linie curbă (fig. XII.14 *b*).

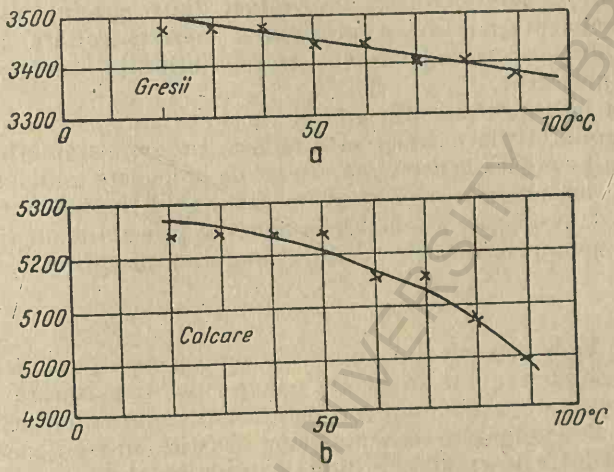


Fig. XII.14. Variația vitezei de propagare a semnalelor acustice în funcție de temperatură [11].

Consolidarea (cimentarea). Efectul consolidării unui mediu asupra vitezei de propagare a undelor acustice se determină în laborator pe un model format din sfere de sticlă de dimensiuni diferite. În cazul cînd sferele nu sînt supuse nici unei presiuni, acestea se ating numai în puncte. Suprafețele de contact ale unui astfel de mediu sînt infinit de mici și mediul va transmite o cantitate redusă de energie acustică. Dacă asupra modelului se aplică o presiune externă, punctele de contact dintre sfere devin suprafețe. Proprietățile elastice ale modelului vor depinde de mărimea presiunii aplicate. Dacă sferele de sticlă sînt cimentate, modelul va deveni rigid.

În cazul unei roci ale cărei granule sînt cimentate (cazul calcarelor rigide), viteza de propagare a undelor acustice nu va crește proporțional cu presiunea aplicată din exterior. În cazul unei roci ale cărei granule nu sînt cimentate (cazul nisipurilor neconsolidate etc.), viteza de propagare a semnalelor acustice va crește proporțional cu presiunea aplicată din exterior [11, 12].

Saturația cu fluide și natura fluidelor influențează în mod diferit viteza de propagare a semnalelor acustice printr-un mediu, după cum se va arăta în cele ce urmează.

Într-un mediu format din granule necimentate, prezența unui fluid umectat (apă) conduce la creșterea vitezei de propagare a semnalelor acustice, îndeosebi în condiții de presiuni joase.

În medii la care suprafața de contact dintre granule este mare, ca urmare a cimentației sau a presiunilor mari exercitate din exterior, viteza de propagare a undelor acustice este influențată puțin de prezența fluidului umectant.

Într-un mediu format din granule necimentate și asupra căruia presiunea exercitată din exterior este redusă, prezența unui fluid neumectant (petrol) conduce la creșterea vitezei de propagare a undelor acustice, însă într-o măsură mai mică decît în cazul cînd fluidul ar fi umectant.

Viteza de propagare a semnalelor acustice prin fluide depinde de densitatea și compresibilitatea acestora conform, inegalității

$$v_{apă} > v_{petrol} > v_{gaze} \qquad \text{(XII.17)}$$

Ca urmare a dependenței vitezei de propagare a semnalelor acustice de natura fluidelor, într-un mediu omogen pot fi măsurate viteze diferite de propagare a acestora, corespunzînd variației naturii fluidelor.

Viteza de propagare a semnalelor acustice într-un mediu omogen poate varia între 15 și 30%, în funcție de natura fluidului saturant [12].

Natura rocilor. Influența naturii rocilor asupra vitezei de propagare a semnalelor acustice este legată de densitatea și proprietățile elastice ale matricei rocii. În tabelul 10 sînt date vitezele de propagare a undelor acustice în matricea unor roci.

Influența ciclurilor neînregistrate. Impulsurile emise de generatorul dispozitivului au o frecvență obișnuită de 20 000 Hz și o perioadă de 50 μs. Frecvența impulsurilor este limitată, pentru a se reduce ciclurile neînregistrate (Cycle skipping). Crescînd frecvența, crește și numărul ciclurilor neînregistrate.

Semnalele acustice sînt caracterizate, pe lîngă frecvență și lungimea de undă, și prin energia lor. Energia e a fiecărui ciclu, component al unui semnal acustic, este proporțională cu amplitudinea (v. fig. XII.15).

Obișnuit, energia primului ciclu dintr-un semnal acustic e_1 este mai mică decît energia ciclurilor următoare.

Sistemul de recepționare și înregistrare a semnalelor acustice sosite la receptorii dispozitivului se bazează pe nivelul energetic „e" al semnalului (ciclurilor) recepționat. În cazul cînd nivelul energetic al semnalului acustic nu depășește un anumit prag (e_p) recepționarea nu are loc.

Tabelul 10

Valori uzuale pentru v_m, v_f și $\triangle t$ în matricea unor roci

Denumirea rocii sau fluidului saturat	v_m		v_f		Δt	
	picior/s	m/s	picior/s	m/s	μs/picior	μs/m
Dolomit	23 000	7 700	—	—	43,5	—
Calcar	21 000	6 300	—	—	47,7	—
Gresii	18 000	5 400	—	—	55,5	—
Nisip neconsolidat	14 900	4 500	—	—	83,3	
	10 600	3 200				
Marne	9 000	2 700	—	—	111,0	—
Calcit	22 000	6 600	—	—	45,5	—
Anhidrit	20 000	6 100	—	—	50,0	164
Granit	19 700	5 910	—	—	50,8	—
Gips	18 900	—	—	—	53,0	—
Cuarț	18 000	—	—	—	55,5	—
Sare	15 000	4 500	—	—	66,7	22,2
Ciment	12 000	—	—	—	83,3	—
Eșantion coloană	17 500	—	—	—	57,1	—
Apă cu 20 % NaCl	—	—	5 300	—	189,0	—
Apă cu 15 % NaCl	—	—	5 000	—	200,0	—
Apă cu 10 % NaCl	—	—	4 800	—	208,0	—
Apă (pură)	—	—	4 600	—	218,0	—
Petrol	—	—	4 200	—	238,0	—
Metan	—	—	1,600	—	626,0	—
Aer	—	—	1 100	—	910,0	—

Transformarea picioarelor în metri s-a făcut înmulțind cu 0,3

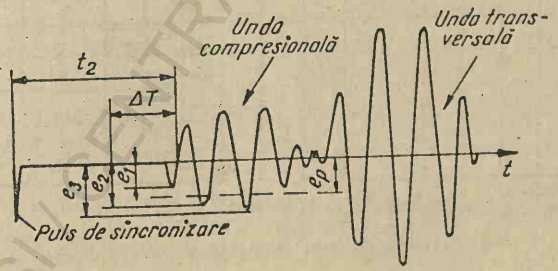


Fig. XII.15. Semnal acustic. Proporționalitatea dintre energie și amplitudine: $e_1 < e_2 < e_3$; $e_1 < e_p < e_2$ și e_3.

Să presupunem că la unul din receptori a sosit un semnal acustic ca cel prezentat în fig. 15, iar nivelul pragului energetic al dispozitivului de recepționare și înregistrare este e_p. Din figură reiese că energia primului ciclu al semnalului acustic e_1 este mai mică decît pragul ener-

getic e_p de recepționare: $e_1 < e_p$. În acest caz, primul ciclu nu va fi înregistrat și deci pe diagramă în mod fictiv se va înregistra o creștere a timpului de propagare a semnalului acustic cu 50 μs.

Energia ciclului al doilea e_2 al semnalului acustic (după cum reiese din figură) fiind mai mare decît pragul energetic e_p va fi recepționată ($e_2 > e_p$).

În cazul cînd și al doilea ciclu al semnalului acustic ar fi avut energia mai mică decît e_p, evident nici acesta nu ar fi fost înregistrat și atunci pe curba înregistrată timpul s-ar fi mărit fictiv cu 100 μs.

Creșterea fictivă a timpului pe curbele de viteză Δt ca urmare a ciclurilor neînregistrate este prezentată în fig. XII.7.

Influența zgomotelor. Un zgomot al cărui nivel energetic este mai mare decît e_p conduce la declanșarea circuitului de recepționare. Aceasta are drept rezultat creșterea numărului impulsurilor înregistrate, respectiv la reducerea fictivă a timpului de propagare a semnalelor acustice, după cum este arătat în fig. XII.16.

Avînd caracter întîmplător, zgomotele pot fi identificate pe diagrafii, în special pe oscilograme. O dată identificate, ele pot fi eliminate,

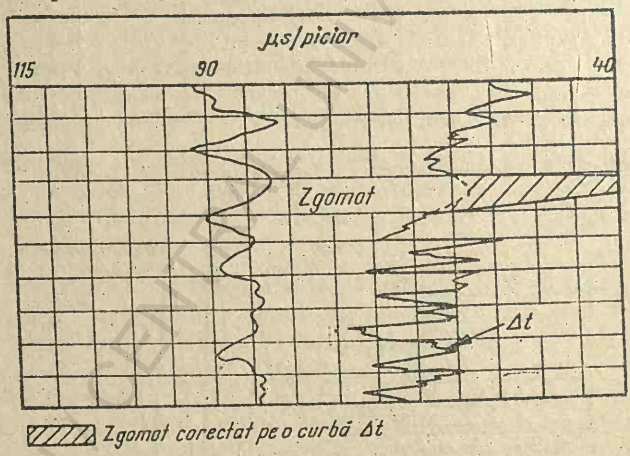


Fig. XII.16. Zgomot corectat pe o curbă Δt.

iar curba poate fi corectată, utilizînd datele oferite de oscilograme (cazul intervalului haşurat din fig. XII.16).

1.4. Determinarea porozității (∅)

Primele experiențe care au arătat că viteza de propagare a semnalelor acustice depinde de porozitate au fost făcute de Hicks și Berry

[13]. În anul 1956, M.R.J. Wyllie și alții [14] au stabilit o relație între viteză și porozitatea φ pentru un mediu omogen supus la o presiune suficient de mare:

$$\varphi = \frac{\Delta t_{diag} - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m}, \qquad \text{(XII.18)}$$

în care: Δt_{diag} este timpul citit pe diagrafia sonică, în μs/m sau μs/picior;

Δt_m — timpul de propagare prin matrice, în μs/m sau μs/picior;

Δt_f — timpul de propagare prin fluide, în μs/m sau μs/picior.

În vederea determinării porozității formațiunilor, acestea se clasifică în trei categorii:

— Formațiuni consolidate, în care argilele sînt compacte și se caracterizează printr-o viteză mare de propagare a semnalelor acustice: $v_{arg} > 3\,000$ m/s, respectiv $\Delta t_{arg} < 100$ μs/picior;

— Formațiuni semiconsolidate, în care argilele se caracterizează printr-o viteză medie de propagare a semnalelor acustice: $v_{arg} \approx 3\,000$ m/s, respectiv $\Delta t = 100$ μs/picior;

— Formațiuni neconsolidate, în care argilele se caracterizează printr-o viteză mică de propagare a semnalelor acustice: $v_{arg} < 3\,000$ m/s, respectiv $\Delta t > 100$ μs/picior.

1.4.1. *Determinarea porozității formațiunilor consolidate*

În acest gen de formațiuni presiunea sedimentelor și a fluidelor conținute în porii rocilor nu influențează măsurătorile de porozitate. Determinarea porozității se realizează utilizînd relația lui Wyllie [18].

S-au construit abace de interpretare pentru determinarea porozității în baza relației menționate. Firma P.G.A.C. utilizează abaca din fig. XII.17 [15].

Deosebit de important pentru obținerea unor valori ale porozității cît mai apropiate de realitate este cunoașterea vitezei de propagare a semnalelor acustice în matricea rocilor.

Un procedeu simplu constă în observarea pe diagrafiile neutronice a zonelor compacte, care sînt reprezentate pe asemenea diagrafii prin anomalii cu amplitudini foarte mari. Pentru confirmarea intervalului compact este bine să se observe dacă și pe curbele înregistrate cu microdispozitive acesta este reprezentat prin anomalii cu amplitudini mari. În acest caz, viteza în matrice se poate lua în dreptul intervalului confirmat a fi compact.

Alt procedeu este de a alege un interval în care rocile sînt saturate 100% cu apă, după diagrafiile de rezistivitate sau prin corelarea cu profilele altor sonde la care se cunosc stratele saturate 100% cu apă de zăcămînt.

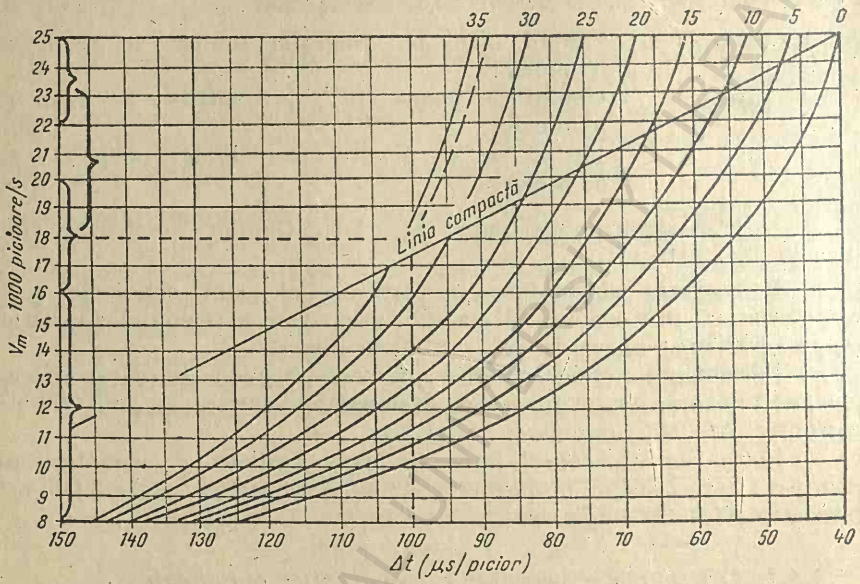


Fig. XII.17. Abacă pentru determinarea porozității rocilor consolidate cu procent redus de marne [15].

Dacă s-a găsit un asemenea interval se determină porozitatea utilizînd relația

$$ø^2 = \frac{\rho_w}{\rho_o} \text{ sau } ø = \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_o}} \qquad \text{(XII.19)}$$

Introducînd valoarea porozității astfel calculată în relația XII.18 și considerînd că $\Delta t_f = 200$ μs/picior se obține timpul de propagare în matrice:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{diag} - 200\sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_o}}}{1 - \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_o}}} \qquad \text{(XII.20)}$$

Cînd pe diagrafii nu se pot separa intervalele compacte sau acvifere saturate 100% cu apă de zăcămînt, pentru determinarea vitezei în matrice

se utilizează datele din tabelul 10, în care sînt trecute v_m și v_f pentru rocile frecvent întîlnite în foraje.

Pentru stabilirea lui v_m cît mai aproape de realitate este necesar să se cerceteze profilul geologic al sondei stabilit după probe de sită și caortele mecanice extrase.

În cazul formațiunilor consolidate la care procentul de argilă „p" este crescut, valoarea porozității obținute este superioară celei reale și anume este majorată cu un coeficient K_{arg} care variază între 0,2 la 0,4 și se determină cu ajutorul relației

$$k_{arg} = \frac{\Delta t_{arg} - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m}, \qquad \text{(XII.21)}$$

în care: Δt_{arg} este timpul de propagare a semnalelor acustice prin argile, restul notațiilor fiind ca în relația XII.18.

Porozitatea reală pentru rocile argiloase se determină cu relația:

$$\varnothing = \varnothing_s - k_{arg} \cdot p, \qquad \text{(XII.22)}$$

în care $\varnothing_s$ este porozitatea determinată după relația XII.18, iar p — procentul de argilă.

Exemplu pentru determinarea porozității rocilor consolidate cu procent redus de marne utilizînd abaca din fig. XII.17.

Se cunosc: $v_m = 18\,000$ picioare/s și $\Delta t = 100$ μs/picior.

Se notează v_m în ordonată, iar din punctul respectiv se trasează orizontala pînă întîlnește verticala ridicată de pe abscisă din punctul care marchează $\Delta t = 100$ μs/picior. Se citește pe curba care indică porozitatea $\varnothing \approx 34\%$ (prin interpolare).

1.4.2. *Determinarea porozității formațiunilor semiconsolidate*

Porozitatea formațiunilor semiconsolidate curate se determină cu relația XII.18 sau folosind abaca din fig. XII.17. Porozitatea acestor formațiuni determinată ca mai sus, cînd sînt saturate cu hidrocarburi sau sînt marnoase, este mai mare decît porozitatea reală: de aceea sînt necesare corecții.

Tabelul 11

Natura fluidului	Coeficient de corecție
Gaze	0,7
Petrol	0,8—0,9

Corectarea porozității rocilor semiconsolidate saturate cu hidrocarburi, determinată cu relația XII.18 sau după abace, se face aplicînd coeficienții de corecție din tabelul 11.

Corecția porozității rocilor semiconsolidate pentru conținutul în argilă se face utilizînd relația:

$$\varnothing_{reală} = \frac{\varnothing_A}{2-\alpha} \qquad \text{(XII.23)}$$

în care $\varnothing_A$ este porozitatea aparentă determinată cu formula XII.18 sau după abace; α—factorul de reducere al PS, care se determină cu relația:

$$\alpha = \frac{PS_{pseudo}}{PS_{st}} \text{ (variază între 0 și 1)} \qquad \text{(XII.24)}$$

Corecția porozității rocilor semiconsolidate care conțin și hidrocarburi și argile se face aplicînd coeficienții de corecție din tabelul 11. În prima etapă se obține porozitatea corectă ($\varnothing_{cor}$). În a doua etapă se face a doua corecție utilizînd relația

$$\varnothing = \frac{\varnothing_{cor}}{(2-\alpha)} \qquad \text{(XII.25)}$$

1.4.3. *Determinarea porozității formațiunilor neconsolidate*

Porozitatea pentru aceste formațiuni determinată cu relația XII.18 sau utilizînd abace este foarte mare și se corectează utilizînd relația:

$$\varnothing_{cor} = \frac{\varnothing_A \cdot 100}{c \cdot \Delta t_{arg}} \qquad \text{(XII.26)}$$

în care c este un coeficient care variază între 0,8—1,2 și depinde de condițiile locale; Δt_{arg} — timpul de propagare mediu obținut din diagrafia sonică în marnele adiacente stratului cercetat în μs/picior; $\varnothing_A$ — porozitatea dedusă din formula XII.18 sau din abace.

Valoarea lui c se determină dintr-un caz particular, cînd se cunoaște porozitatea efectivă a unui nisip neconsolidat. O dată determinată valoarea lui c, se poate efectua etalonarea măsurătorilor de porozitate pentru restul formațiunii.

După cum rocile neconsolidate conțin sau nu hidrocarburi și după cum conțin sau nu marne, se aplică corecția numai pentru hidrocarburi, sau numai pentru conținut în marne sau amîndouă corecțiile, după cum s-a indicat în cazul rocilor semiconsolidate.

Din interpretările efectuate, se consideră că determinarea porozității rocilor neconsolidate după diagrafiile sonice nu oferă indicații satisfăcătoare, deoarece sînt necesare corecții în care intervin coeficienți care la rîndul lor trebuie calculați.

1.5. Determinarea rezistivității apei din formațiunile saturate 100 % cu apă de zăcămînt

Pentru determinarea rezistivității apei dintr-un strat permeabil și poros după diagrafiile acustice, Tixier, plecînd de la ipoteza că rezistivitatea stratelor adiacente constituite din argile reflectă gradul de

tasare a acesteia, iar rezistivitatea apei pe care o conțin saturează probabil și porii stratului permeabil și poros, a propus următoarea relație:

$$\rho_{arg} = F_{arg} \times \rho_w \qquad \text{(XII.27)}$$

în care

ρ_{arg} este rezistivitatea argilei, determinată din diagrafiile de rezistivitate sau de conductivitate;

F_{arg} — factorul de rezistivitate al argilei, care poate fi determinat din diagrafia sonică, cu ajutorul relației:

$$F_{arg} = \frac{K}{\Delta t_{arg} - 70}, \qquad \text{(XII.28)}$$

în care K este un coeficient avînd valori cuprinse între 500 și 600, iar Δt_{arg} se citește pe diagrafiile sonice.

Înlocuind valoarea lui F_{arg} în relația XII.27 se obține:

$$\rho_w = (\Delta t_{arg} - 70)\frac{\rho_{arg}}{500}. \qquad \text{(XII.29)}$$

1.6. Metodă pentru aprecierea dacă un strat este petrolifer prin studierea raportului F_r/F_s

După Tixier, un strat se consideră posibil purtător de hidrocarburi cînd raportul menționat este mai mare decît unu

$$\frac{F_r}{F_s} > 1 \qquad \text{(XII.30)}$$

F_r este dat de raportul $\rho_{16''}/\rho_f$, iar F_s de raportul $1/\phi^2_s$.

1.7. Domeniul de aplicabilitate a diagrafiilor sonice

Diagrafia sonică are următoarele utilizări:

— pentru determinarea porozității formațiunilor, în special a formațiunilor tari, cum sînt rocile carbonatate;

— pentru corelarea profilelor de sondă, mai ales în cazul formațiunilor la care diagrafiile electrice clasice nu sînt reprezentative. Diagrafiile sonice nu sînt influențate de natura fluidului de foraj în măsura în care sînt influențate diagrafiile de rezistivitate clasice;

— la interpretarea datelor prospecțiunii seismice de reflexie și refracție;

— pentru a stabili dacă stratele pot fi sau nu petrolifere, prin studiul raportului F_r/F_s;

— pentru detectarea stratelor de cărbuni, chiar a celor de ordinul centimetrilor [17].

Pe parcursul său, semnalul acustic suferă o serie de alterări datorită formațiunilor și fluidelor din formațiuni, alterări care se reflectă prin variația aspectului trenului de unde ale semnalului.

Studiul variației aspectului trenului de unde, care în fond este studiul parametrilor acustici, oferă informații în general calitative asupra naturii formațiunii și fluidelor ce le conțin.

Pentru caracterizarea alurei semnalului acustic ar fi necesar să se studieze în jur de 20 parametri, care, practic ar fi imposibil să se înregistreze sub formă de diagramă. De aceea, în prezent se înregistrează numai doi parametri principali sub formă de diagramă și anume:

— amplitudinea primei sosiri negative a undei longitudinale;

— amplitudinea undei transversale.

Perioada, al treilea parametru, se prezintă sub formă de diagramă, folosind în acest scop oscilogramele.

O serie de alți parametri ai semnalului acustic, care nu sînt înregistrați sub formă de diagramă și care contribuie la interpretare, se studiază direct pe oscilograme. Dintre aceștia citățm:

— persistența semnalului acustic;

— energia totală (care dă aproximativ aceleași indicații ca și persistența);

— raportul dintre viteza undei transversale și viteza undei longitudinale.

Anterior a fost studiată viteza de propagare a undei longitudinale, care este tot un parametru acustic, însă acesta nu se referă la variația aspectului semnalului acustic.

2.1. Factorii care alterează semnalul acustic

Pe parcursul generator-receptor, semnalul acustic se alterează datorită următoarelor cauze;

— atenuarea energiei, în funcție de natura rocilor și a fluidelor cu care sînt saturate;

— distorsiunea trenului de unde, determinată de reflexiile provocate de fracturi sau de limitele dintre formațiunile cu viteză de propagare rapidă și formațiunile cu viteză de propagare lentă.

Atenuarea energiei se referă la scăderea în direcția razei a energiei undelor acustice cînd acestea se propagă printr-un mediu. În medii omogene cu grosime mare atenuarea este progresivă.

Unitatea de măsură a atenuării este decibelul. Un decibel (dB) este nivelul presiunii acustice al cărui raport față de pragul convențional

de presiune de 0,00002 N/m^3, luat ca nivel zero are logaritmul zecimal înmulțit cu 20 egal cu unitatea.

Atenuarea energiei acustice datorită naturii rocilor și fluidelor ce le conțin are loc în direcția razei și depinde de lungimea drumului parcurs, în lungul căruia au loc fenomene de absorbție și dispersie. Pe măsura atenuării undelor acustice se reduce și amplitudinea acestora. Variația amplitudinii undei în funcție de distanță este descrisă de relația

$$A_r = A_0 e^{-\alpha(\rho) r} \qquad \text{(XII.31)}$$

în care A_r este amplitudinea la distanța r; A_0 — amplitudinea pentru $r=0$; α — coeficientul de absorbție; ρ — frecarea (pentru mediile geologice reale, α are valorile $0{,}001 < \alpha < 0{,}1$).

Întrucît α depinde de frecvență, diferitele componente ale spectrului undei acustice vor fi atenuate în mod diferit și prin urmare, pe măsura propagării undei acustice, se va schimba și frecvența predominantă a spectrului ei, ceea ce duce la variația formei oscilațiilor înregistrate [4].

Absorbția se explică prin existența unui histerezis elastic, manifestat prin incompleta reversibilitate a deformației mediului, ceea ce duce la transformarea parțială a energiei elastice în alte feluri de energii, în particular calorică. Conform acestei teorii, denumită a *post-acțiunii elastice*, coeficientul de absorbție este o funcție liniară de frecvență.

O altă teorie — teoria frecării vîscoase — explică atenuarea prin existența procesului de frecare în roci; în acest caz, coeficientul de absorbție este proporțional cu pătratul frecvenței.

Deci, în ambele cazuri, componentele cu frecvențe mai înalte vor suferi o atenuare mai puternică.

Dispersia undelor acustice este legată de numeroasele difracții ale undelor elastice provocate de neomogenitățile din mediul geologic. Datorită acestui fenomen, energia undelor acustice se consumă parțial pentru formarea unor unde slabe de dispersie. S-a constatat că fenomenul de dispersie afectează mai mult componentele de înaltă frecvență, deci același mediu se manifestă mai omogen pentru undele cu lungime mai mică (frecvență mai mare) decît pentru cele cu lungime mare (frecvență mai mică). Se observă că și din această cauză, spectrul undei se modifică cu distanța, în sensul deplasării frecvenței predominante spre domeniul frecvențelor joase. Atenuarea datorită absorbției și dispersiei se determină prin studiul variației amplitudinilor undelor longitudinale și transversale ale semnalelor acustice după ce au traversat formațiunile [4].

Distorsiunea sau deformarea semnalelor acustice în cursul propagării lor de la generator la receptor este neliniară, deoarece în unele cazuri apar pe lîngă componentele inițiale de o anumită frecvență ale semnalelor emise de generator și componente de o frecvență diferită de cea

primară, ca urmare a reflexiilor provocate fie de fracturi, fie de limitele dintre strate cu viteze de propagare rapidă și formațiunile cu viteză de propagare lentă.

2.2. Alterarea undelor longitudinale și transversale pe parcursul generator-receptor

Pe parcursul de la generator la receptor, semnalele acustice suferă o serie de alterări.

Alterarea semnalelor acustice datorită propagării acestora prin noroiul de foraj. Aceasta se poate neglija în cazul dispozitivelor cu doi sau trei receptori (după cum s-a arătat la § XII.1.2).

Alterarea semnalelor acustice datorită pătrunderii acestora din noroi în formațiune și din formațiune în noroi. Transmiterea energiei de la un mediu la altul depinde de impedanța acustică specifică* a mediilor respective.

Dacă impedanța acustică specifică a două medii adiacente diferă considerabil, transmiterea energiei este foarte redusă și se produce reflecția aproape completă.

În funcție de impedanța mediilor adiacente, amplitudinile semnalelor acustice pot crește cînd se trece de la un mediu dens la un mediu mai puțin dens și descrește cînd se trece de la un mediu mai puțin dens la un mediu dens. În tabelul 12 sînt trecute impedanțele acustice ale unor medii.

În fig. XII.18 se prezintă modul de transmitere a energiei acustice în cazul a două medii de impedanțe acustice specifice diferite R_1 și R_2.

Amplitudinea undei refractate A_2 — transmisă — se calculează cu relația

$$A_2=\frac{2A_1R_1}{R_1+R_2} \qquad \text{(XII.32)}$$

în care A_1 este amplitudinea undei incidente; A_2=amplitudinea undei refractate; R_1 și R_2 — impedanțele acustice specifice ale mediilor *1* și *2*.

Exemplu de calcul al amplitudinii undei refractate A_2. Mediile adiacente sînt apă și calcar. Impedanța R_1 pentru apă este egală cu 15×10^{-4}, iar impedanța R_2 pentru calcar este egală cu 108×10^{-4}.

---

* Impedanță acustică Z_a este raportul complex dintre presiunea acustică eficace p pe o suprafață normală pe direcția de propagare și fluxul de viteză acustică U corespunzător aceleiași suprafețe $Z_a=p/U$.

În cazul cînd energia acustică se propagă dinspre apă spre calcar, amplitudinea undei refractate va fi:

$$A_2 \text{ (apă-calcar)} = A_1 \frac{2R_1}{R_2 + R_1} = \frac{2 \times 15}{108 + 15} A_1 = 0{,}244 \; A_1$$

Tabelul 12

Impedanțe acustice specifice ale unor medii [16]

Denumirea mediului	Impedanța acustică specifică, $R \times 10^{-4}$
Aer	0,0042
Cauciuc	0,29—0,66
Apă sărată	15
Petrol	132
Oțel	390
Marmoră	99
Gresie	63—95
Calcare	108
Sare	25—50
	valoare medie
	40

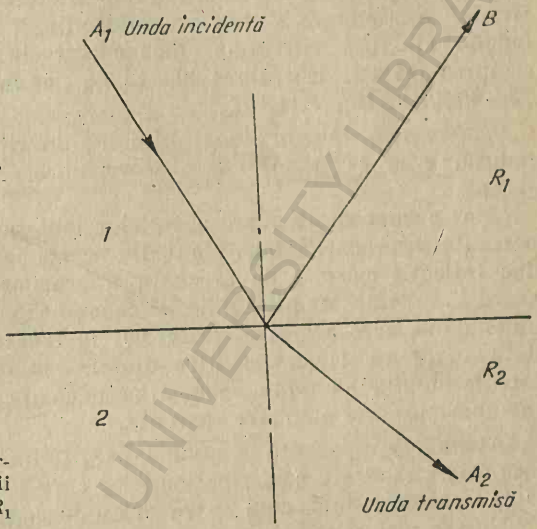


Fig. XII.18. Transmiterea energiei acustice în cazul a două medii de impedanțe acustice diferite R_1 și R_2.

Alterarea semnalelor acustice în timpul propagării prin formațiune. Această alterare se datorează următoarelor cauze: 1) Atenuarea energiei în funcție de: natura rocilor; natura fluidelor existente în porii rocilor; factorii geometrici ai dispozitivului și 2) Distorsiunea.

— Atenuarea energiei semnalelor acustice datorită factorilor geometrici ai dispozitivului este proporțională cu distanța dintre generator și receptor și cu distanța dintre receptori. În cazul dispozitivului cu doi receptori, energia măsurată este

$$e = e_2 - e_1.$$

— Atenuarea datorită naturii rocilor și fluidelor depinde de impedanța acustică specifică a mediului traversat, de absorbția și de dispersia energiei.

— Atenuarea energiei semnalelor acustice datorită naturii rocilor depinde de structura și textura rocilor și mai puțin de compoziția chimică. Porozitatea este factorul principal de care depinde atenuarea semnalelor acustice (Aici se includ și fracturile).

Atenuarea cea mai pronunțată a undelor longitudinale s-a observat în cărbuni și în formațiuni care conțin asfalt.

— Atenuarea energiei semnalelor în funcție de fluidele conținute în porii rocilor se referă la reducerea energiei acustice transmisă de undele longitudinale. Hidrocarburile determină o atenuare caracteristică (v. fig. XII.19). Atenuarea cea mai pronunțată are loc în prezența gazelor. Gradul de atenuare a undelor longitudinale datorită prezenței hidrocarburilor n-a fost determinat încă cantitativ. Totuși, atenuarea în gaze se apreciază a fi de ordinul 90—100%, iar în cazul petrolului de ordinul 70—90% (v. fig. XII.19).

Atenuarea undelor longitudinale datorită prezenței apei este mai redusă, ceea ce permite a observa uneori limita dintre hidrocarburi și apă.

Sînt cazuri de atenuare a undelor longitudinale care nu se datorează prezenței hidrocarburilor. Unul din aceste cazuri se observă cînd se produc reflecții cauzate de prezența fracturilor apreciabile. În acest caz, energia undelor longitudinale se consumă parțial pentru formarea unor unde slabe, care urmează traiectorii cu lungimi de undă diferite și totodată apare un defazaj. Pentru undele longitudinale defazate cu jumătate de lungime de undă, energia lor se compensează, ceea ce are ca rezultat apariția unei atenuări aparente.

Atenuarea aparentă a undei longitudinale datorită fracturilor se recunoaște studiind curba perioadelor care este mult influențată de prezența acestora, după cum se va arăta în continuare.

Un al doilea caz de atenuare aparentă a energiei undelor longitudinale se observă în cazul prezenței cavernelor. În acest caz, atenuarea se datorează prelungirii drumului parcurs de undele longitudinale prin fluidul de foraj.

Un al treilea caz de atenuare aparentă a energiei undelor longitudinale se observă cînd fluidul de foraj conține gaze dizolvate.

Undele transversale și cele de suprafață, în prezența hidrocarburilor, suferă și ele o slabă atenuare, deseori nesesizabilă. În cazul existenței fracturilor și fisurilor, undele transversale suferă alterări cu atît mai evidente cu cît discontinuitățile în direcția razei sînt mai mari.

Fracturile au o mare influență asupra perioadei semnalelor acustice. Traversînd o zonă fracturată, sau o serie de strate subțiri și cu viteze de propagare diferite, semnalele sînt dispersate în mai multe direcții. Undele ce se propagă în direcții diferite vor avea lungimi de undă diferite, ceea ce provoacă un defazaj care conduce la apariția unei distorsiuni vizibile a primei perioade care sosește la receptori. Consecința distorsiunii perioadei primului semnal care sosește la receptori se traduce pe diagrama prelucrată* prin variații

---

* Diagrama perioadelor nu se înregistrează continuu, ci se construiește după oscilograme.

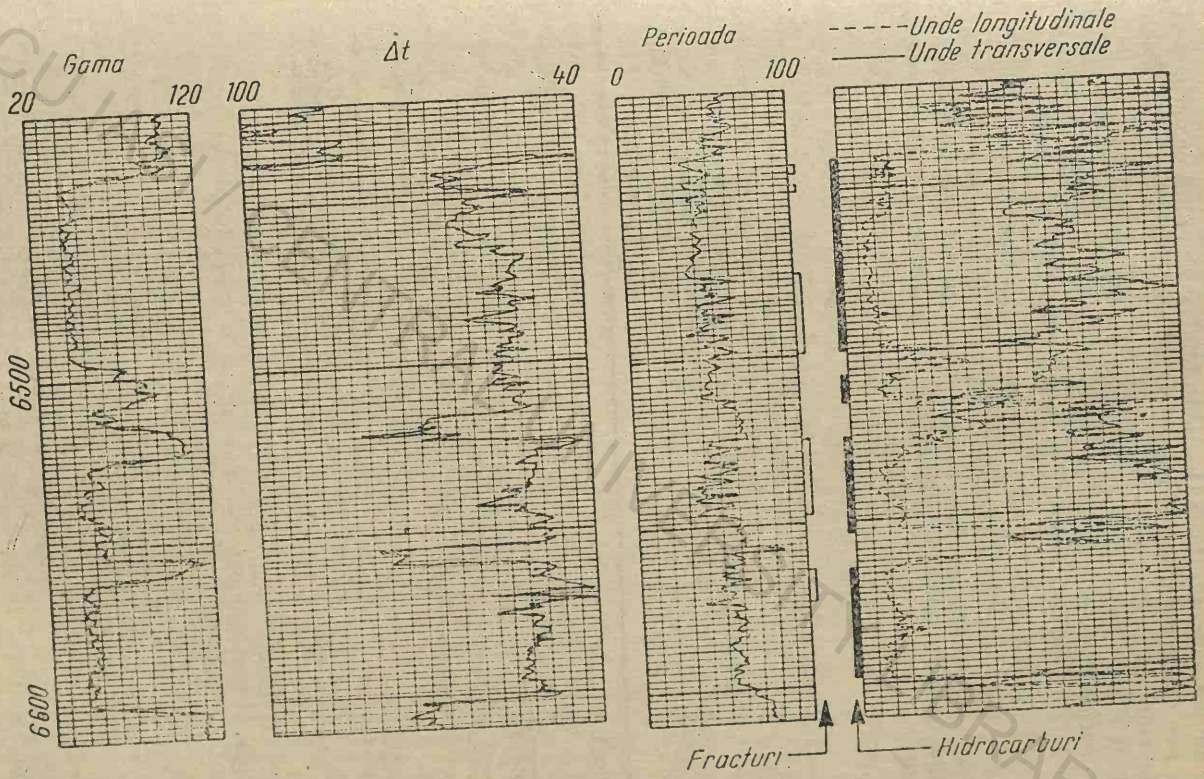


Fig. XII.19. Diagrafia complexă a parametrilor acustici pe care se evidențiază prezența hidrocarburilor și a fracturilor.

bruște ale perioadei (v. fig. XII.19). În felul acesta, cînd pe curba perioadei se vor observa variații bruște, acestea vor indica prezența fracturilor, fisurilor, sau alternanței de strate subțiri cu viteze diferite de propagare (cu impedanțe acustice mult diferențiate). Din compararea diagrafiei perioadei cu alte curbe înregistrate se pot distinge anomaliile ce apar datorită fisurilor, fracturilor și alternanțelor de strate.

Fisurile și fracturile situate în plan orizontal apar mai evident pe curba perioadei decît cele situate în plan vertical.

În tabelul 13 este arătată corespondența dintre parametrii acustici și caracteristicile fizice ale formațiunilor și ale conținutului acestora în fluide.

Tabelul 13

	Comportarea parametrilor acustici					
	Amplitudinea undelor compresionale	Amplitudinea undelor transversale	Perioada	Persistență	Viteza undelor compresionale și transversale	t (un picior)
Hidrocarburi	Foarte diminuată					
Permeabilitate		Puțin diminuată	Puțin mărită			
Porozitate			Puțin mărită			Crește
Fracturi deschise		Diminuată	Variație bruscă	Diminuată		Puțin diminuată
Densitate		Crește	Puțin diminuată	Foarte mărită	Puțin mărită	
Stratificație înclinată	Puțin diminuată		Variație bruscă			
Pierderi de noroi		Foarte diminuată	Variație bruscă	Foarte diminuată		
Calcar			40 la 55 μs	Mare	1,8	40 la 65 s
Gresie			55 la 65 μs	Mijlocie	1,7	50 la 100 s
Argilă			60 la 70 μs	Scurtă		75 la 120 s

2.3. Studiul parametrilor acustici

Studiul parametrilor acustici pe oscilograme a devenit într-o perioadă scurtă parte integrantă a investigărilor sonice, deoarece prin acest studiu este posibil să se analizeze, pe lîngă parametrii înregistrați sub formă de diagramă, și o serie de alți parametri [3].

Un aspect destul de elocvent al contribuției acestui studiu în clarificare a unor probleme de interpretare este analiza formei curbei ce conturează trenul de unde al semnalului. În calcare, curba de conturare este complet diferită de a gresiilor (v. fig. XII.20 și XII.21). Această observare este destul de prețioasă, fiind singura în măsură a diferenția roci de natură diferită cu proprietăți fizice apropiate, lucru care nu se poate realiza pe diagrafiile de viteză, electrice și radioactive.

În oscilogramele din fig. XII.20 *a* și XII.21 *a* se prezintă aspectul amplitudinii primei sosiri negative a undei longitudinale în formațiuni calcaroase și grezoase fără hidrocarburi, iar în fig. 20 *b* și 21 *b* în aceleași roci cu hidrocarburi. Se observă clar atenuarea amplitudinii primei sosiri negative a undei longitudinale în formațiunile cu hidrocarburi comparativ cu amplitudinea primei sosiri negative în formațiunile ce nu conțin hidrocarburi.

În rocile cu hidrocarburi nefisurate, amplitudinea primei sosiri negative este atenuată însă nedistorsionată, pe cînd în rocile fracturate cu hidrocarburi prima sosire este și atenuată și distorsionată (v. fig. XII 20 *c* și 21 *c*).

Studiul parametrilor acustici pe oscilograme servește și pentru reconstituirea diagrafelor de timp (Δt), cînd au fost cicluri neînregistrate și înregistrări de zgomote (v. fig. XII.7 și 16) și pentru analiza calității cimentării coloanelor (v. fig. XII.23).

3. DIAGRAFII PENTRU CONTROLUL CIMENTĂRII COLOANELOR (CIMENTOMETRIA)

În industria de petrol de mare importanță este cunoașterea calității cimentării, înțelegînd prin aceasta gradul de aderență a cimentului din spatele coloanei la coloană și la formațiune, precum și nivelul pînă la care s-a ridicat cimentul în spatele coloanei.

Spre deosebire de diagrafia de temperatură sau a trasorilor radioactivi, cu care se determină numai nivelul la care s-a ridicat cimentul în spatele coloanelor, pe diagrafiile sonice înregistrate în acest scop se poate stabili și aderența sau lipsa de aderență a cimentului la coloană și la formațiunile traversate de gaura de sondă.

Diagrafiile pentru controlul calității cimentului cuprind două curbe și anume:

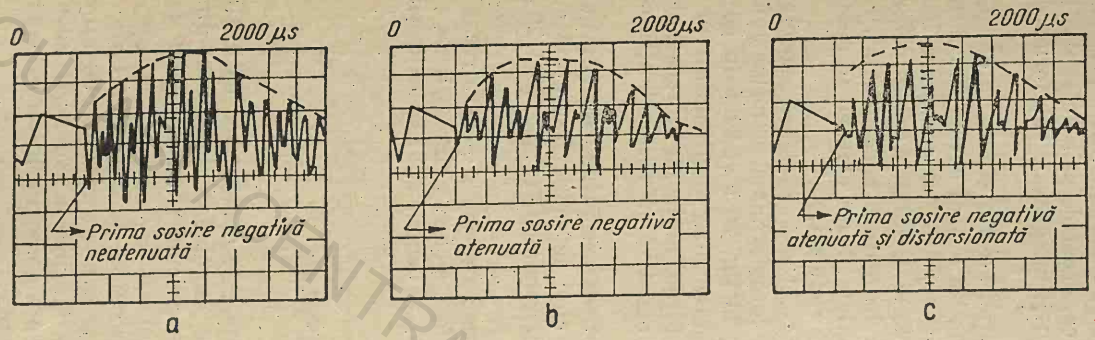


Fig. XII.20. Aspectul semnalelor acustice în roci carbonatate:

a — calcar nefisurat fără hidrocarburi; *b* — calcar nefisurat conținînd hidrocarburi; *c* — calcar fisurat conținînd hidrocarburi (semnalele sînt schematizate).

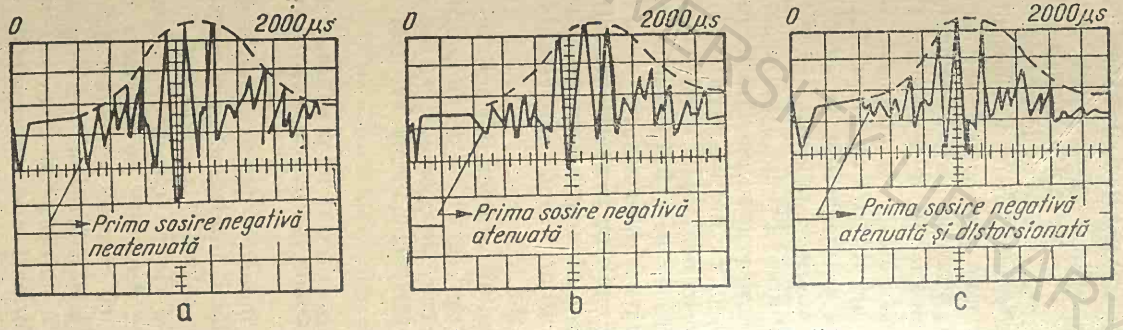


Fig. XII.21. Aspectul semnalelor acustice în gresii:

a — în gresie nefisurată fără hidrocarburi; *b* — în gresie nefisurată conținînd hidrocarburi; *c* — în gresie fisurată conținînd hidrocarburi (semnalele sînt schematizate).

— o curbă a atenuării amplitudinii semnalului acustic;
— o curbă de timp Δt.

Curba atenuării amplitudinii semnalului acustic se înregistrează în partea stîngă a diagramei, iar scara de reprezentare este în volți. Zero al diagramei este în partea stîngă și corespunde unei atenuări foarte pronunțate (cazul unei bune cimentări și a unui inel de ciment gros). Amplitudinile cresc de la stînga spre dreapta. Obișnuit scara este de 4 V/diviziune sau 2 V/diviziune, ceea ce reprezintă pentru 10 diviziuni 40 V respectiv 20 V.

Curba de timp Δt se înregistrează în partea dreaptă a diagramei, iar scara este în μs/picior. Ca și la diagrafiile sonice, timpul crește de la stînga spre dreapta. Prima diviziune este 40 μs și dacă se înregistrează în scara de 10 μs/diviziune, pentru 10 diviziuni vom avea un interval de timp cuprins între 40 și 140 μs.

De cele mai multe ori, semnalele de pe ecranul osciloscopului sînt fotografiate pe film de 16 mm, pentru obținerea unor date suplimentare foarte utile la interpretarea cimentogramelor. Pe oscilograme timpul crește de la stînga spre dreapta (→). Din interpretarea cimentogramelor se poate stabili dacă coloana este liberă, dacă există aderență parțială și dacă este bine cimentată.

— Coloana se consideră liberă cînd nu există ciment în spatele ei, sau există ciment însă acesta nu aderă la coloană. Pe curba atenuării amplitudinii semnalului acustic coloana liberă este reprezentată prin anomalii cu amplitudini mari (→). Pe intervalele în care coloana este liberă semnalul nu este atenuat, el propagîndu-se aproape în întregime prin coloană, deci nu se consumă energie, astfel că la receptor va sosi un semnal puternic, neatenuat (v. fig. XII.22). Intervalele în dreptul cărora coloana este liberă se recunosc pe curba amplitudinii prin aceea că mufele burlanelor sînt reprezentate prin anomalii a căror amplitudine este mai mică decît amplitudinea din dreptul burlanului liber. Intervalele în care coloana este liberă sînt reprezentate pe curba Δt prin timpi de propagare de 57 μs/picior, caracteristici pentru oțel.

Ca și pe curba amplitudinii, pe curba Δt sînt reprezentate și mufele burlanelor, prin anomalii reprezentînd un timp de propagare ceva mai mare decît în dreptul burlanelor. Aceasta se datorează distorsiunii semnalelor acustice atît în momentul trecerii de la un burlan la mufă, cît și de la mufă la burlan (v. fig. XII.22).

— Coloana se consideră parțial cimentată cînd cimentul aderă la coloană dar nu aderă la teren, sau aderă de coloană și teren însă există o porțiune din spațiul inelar fără ciment. Pe curba amplitudinii, intervalele în care coloana este parțial cimentată sînt reprezentate prin anomolii cu amplitudini medii. O parte din energia semnalului este consumată de cimentul care aderă la coloană dar nu aderă și la

formațiune sau este consumată de un volum redus de ciment (care aderă atît la coloană cît și la formațiune), deoarece o parte din volumul spațiului inelar a rămas umplut cu noroi.

Pe curba Δt, intervalele în care coloana este parțial cimentată sînt reprezentate prin anomalii care indică un timp cu puțin diferit de 57 μs (întotdeauna mai mare decît 57 μs).

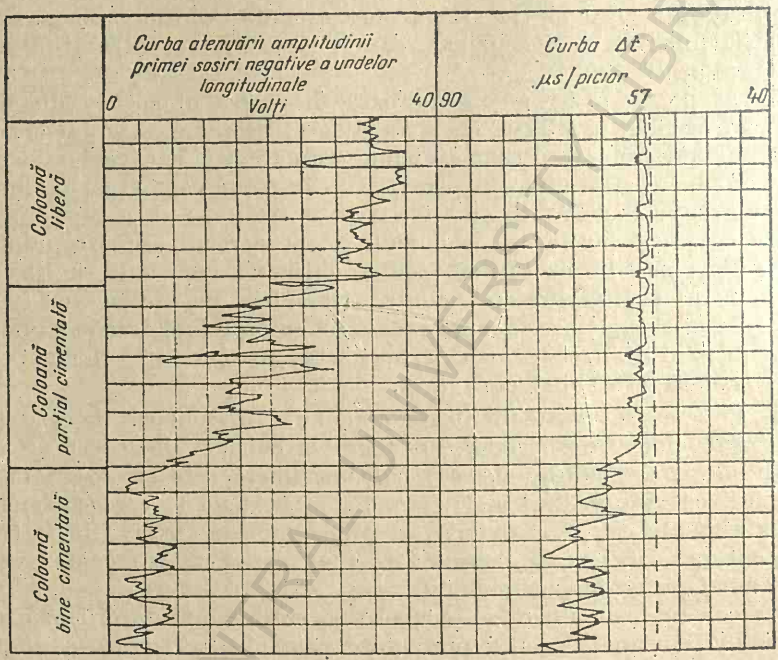


Fig. XII.22. Cimentogramă.

— Coloana se consideră bine cimentată cînd cimentul aderă atît la coloană cît și la teren și spațiul inelar dintre coloană și teren este complet umplut cu ciment. Pe curba amplitudinii, intervalele în care coloana este bine cimentată sînt reprezentate prin anomalii cu amplitudini reduse (aproape de zero), deoarece energia este transferată formațiunii prin coloană și inelul de ciment, astfel că se va recepționa un semnal mult atenuat (v. fig. XII.22 și 23).

Pe curba Δt, intervalele în care coloana este bine cimentată sînt reprezentate prin anomalii care indică un timp diferit de 57 μs și care poate fi mai mare sau mai mic decît acesta.

În fig. XII.23 este prezentată o diagrafie a aderenței prizei cimentului, întocmită de P.G.A.C., care arată pe curba de atenuare a ampli-

tudinii, că intervalul bine cimentat poate fi reprezentat și prin anomalii cu amplitudini mari și aceasta cînd burlanele sînt bine cimentate în formațiuni cu viteze mari de propagare ale semnalelor acustice, cum este cazul calcarelor și dolomitelor.

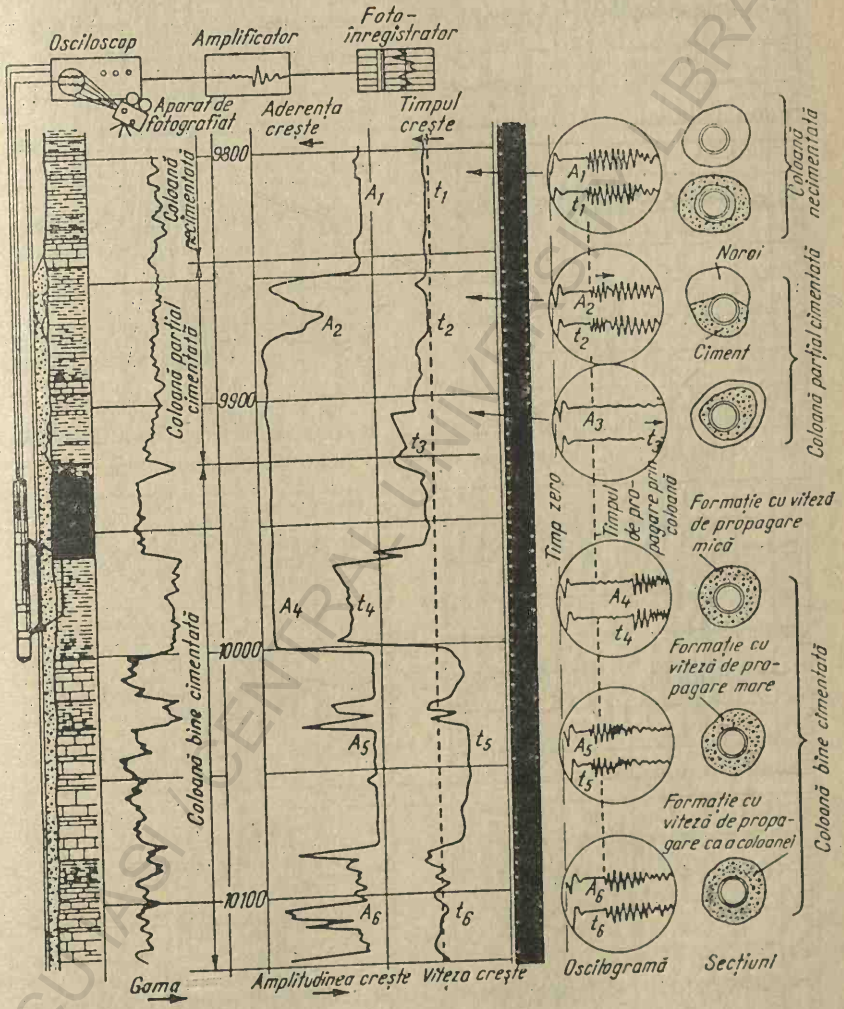


Fig. XII.23. Cimentograme și oscilograme exemplificînd coloană cimentată, coloană parțial cimentată și coloană bine cimentată.

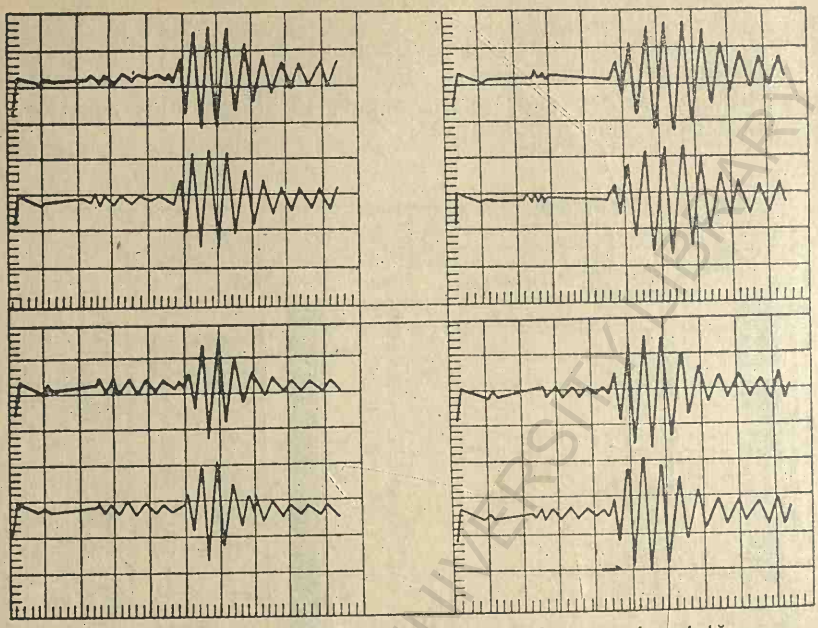


Fig. XII.24. Oscilograme exemplificînd coloana necimentată.

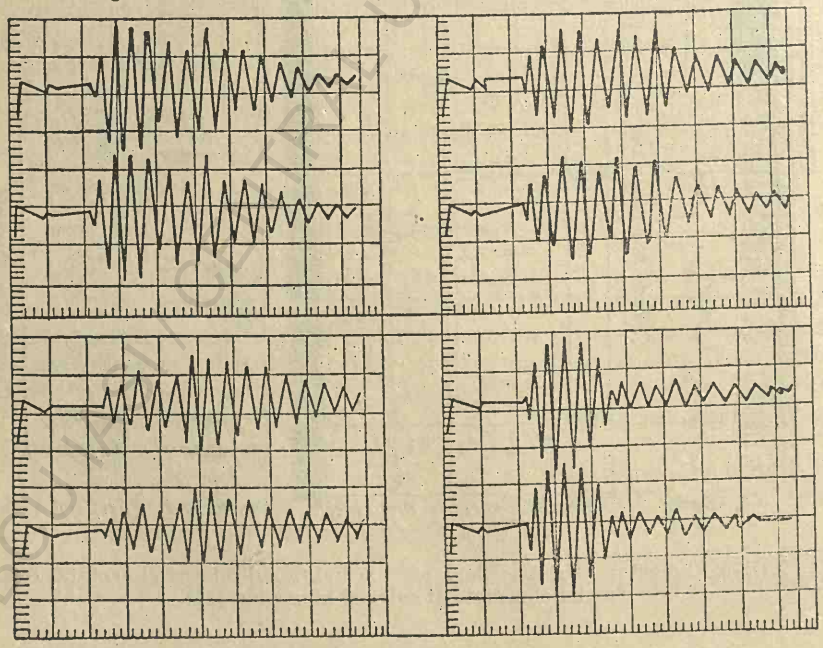


Fig. XII.25. Oscilograme exemplificînd coloane bine cimentate.

În figurile XII. 24, XII. 25 și XII. 26 se prezintă aspectul oscilogramelor în următoarele cazuri:

— fig. XII. 24 — coloană necimentată
— fig. XII. 25 — coloană bine cimentată
— fig. XII. 26 — coloană parțial cimentată.

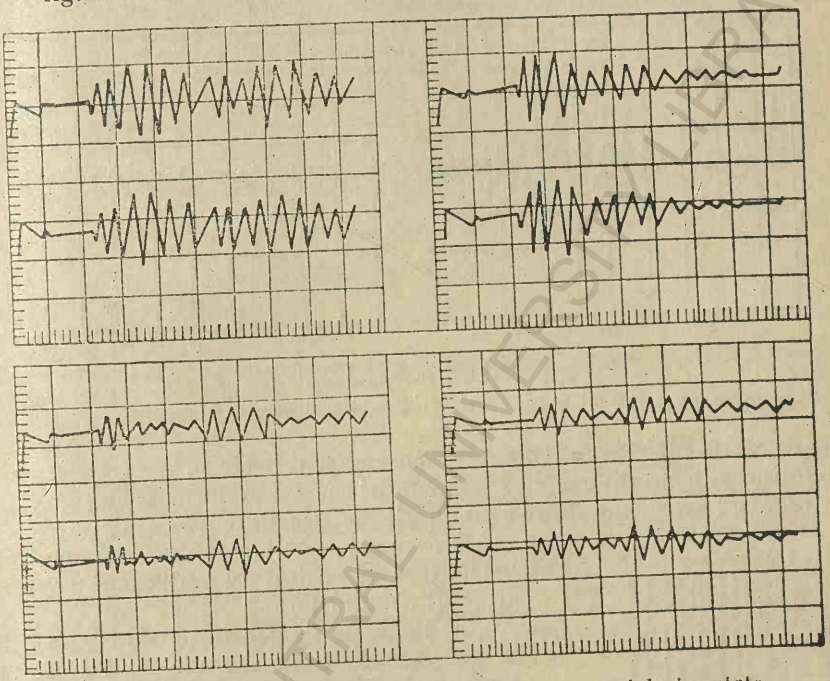


Fig. XII.26. Oscilograme exemplificînd coloane parțial cimentate.

4. DIAGRAFIA DENSITĂȚII VARIABILE (DIAGRAFIA MICROSEISMOSONICĂ)

Aceste diagrafii se obțin prin fotografierea continuă a semnalelor acustice de pe ecranul osciloscopului, care au fost preformate de o manieră specială.

În fig. XII.27 *a* se prezintă un semnal acustic obișnuit, iar în fig. XII.27 *b* un semnal acustic preformat. Semnalul din fig. 27 *b* se obține prin modularea spotului luminos al osciloscopului, astfel ca pe ecran amplitudinile semnalului să fie reduse pînă apar punctiforme și să fie reprezentate numai oscilațiile pozitive ale acestuia (amplitudinile superioare).

Prin reproducerea continuă a semnalelor astfel preformate pe un film fotografic care se deplasează sincronizat cu dispozitivul de măsură se obține diagrafia densității variabile. Cînd dispozitivul de măsură se deplasează în lungul găurii de sondă semnalele acustice suferă modificări care sînt caracteristice formațiunilor prin care s-au propagat.

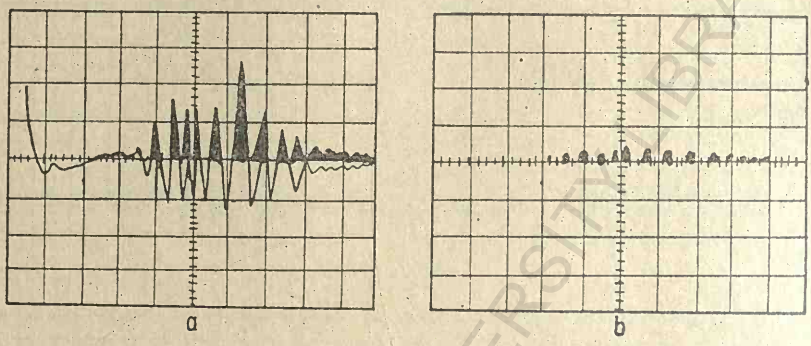


Fig. XII.27. Semnale acustice;
a — semnal acustic normal; *b* — semnal acustic preformat.

Modificările suferite de semnalele acustice se reflectă prin variația amplitudinilor și locului punctelor semnalului acustic preformat. În fig.XII.28 se redă un fragment dintr-o diagrafie de densitate variabilă.

Din analiza diagrafiilor de densitate variabilă este posibil să se distingă existența și felul fracturilor.

În diagrafia de densitate din fig. XII.28, se pot deosebi trei intervale *A*, *B* și *C*, care reprezintă diferite stări structurale ale formațiunii investigate. La nivelul intervalului *A* urmele semnalelor preformate sînt mai mult sau mai puțin regulate și aceasta reprezintă o formațiune omogenă. La nivelul intervalului *B* urmele exterioare ale semnalelor preformate sînt mai mult sau mai puțin regulate, pe cînd urma centrală este neregulată și aceasta indică existența fracturilor verticale. La nivelul intervalului *C*, urmele semnalelor sînt în formă de *W* și aceasta indică cu certitudine existența fracturilor orizontale.

Fig. XII.28. Diagrafie de densitate variabilă.

BIBLIOGRAFIE

1. Tixier, M. I. P., Alger, R. P., Doh, C. A. **Sonic logging. J. of Petroleum Technology,** mai 1959, 11. Traducere în Exploatarea și prelucrarea petrolului, Caiet selectiv nr. 7, 1960, pp. 6—19.
2. Lebreton, F., Arnaud, E. **Les diagraphies acoustiques.** Revue de l'Institut français du pétrole. Vol. XV, nr. 12, dec. 1960, p. 1847—1849.
3. Lloyd, M. Fons. **Utilisation des Parametres du Signal Acoustique pour la localisation directe d'Hydrocarbures et la détermination des zones fracturées.** Bulletin de l'A.F.T.P. nr. 167 din 30 sept. 1964, pp. 572—573.
4. Constantinescu, L. și alții. **Prospecțiuni geofizice,** Vol. II, București, Editura tehnică, 1965, pp. 251—255, 263—264.
5. Gurvici, I. U. **Seismiceskaia razvedka.** Moskva, Gostoptehizdat, 1960.
6. **Diagrafia de viteză.** În: Noutăți în geologie și geofizică, nr. 2—3, febr. mart. 1960, pp. 1—17.
7. **Realizări noi în diagrafia sondelor de țiței și gaze,** București, I.D.T. 1965, pp. 103—109.
8. Wood, A. B. **Comparasion of Well Velocity Methods in South Texas.** Geophysics. B. 24, 3, 1959.
9. Howard, I. **Velocity Logging: A new Family.** The Petroleum Engineer, sept. 1959, p. 420.
10. Stripling, A. A. **Velocity log Characteristics.** A.I.M.E. Petroleum Transactions, sept. 1958, pp. 209—211.
11. Ladefroux J. **Mesure en laboratoire de la vitesse du son dans les roches sedimentaires consolidées.** I.E.P. Avril 1960, p. 367.
12. Lebreton, F., Arnaud, L. **Les diagraphies acoustiques.** Revue de l'Institut français du pétrole. Vol. XV, nr. 12, dec. 1960 p.p. 1836—1837.
13. Hicks, W. și Berry, J. **Applications of CVL to Determination of Fluid Saturation of Reservoir Rocks. Geophysics,** iulie 1956, 21, pp. 739—954.
14. Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., Gardner, L. M. **Elastic Waves Velocities in Heterogeneous and Porous Media Geophysics,** janv. 1956, 21, pp. 41—70.
15. **Loganalysis Handbook,** P.G.A.C. — 1966.
16. Turber, C. H. **SATA log. Soc. of Petroleum Eng. A.I.M.E.,** nr. 1564, 1960.
17. Schwartzer, T., Desbrandes, R. **Divergences constaté dans la mesure de la vitesse des ondes acoustiques longitudinales du carbon.** Révue de l'institut Français du Pétrole, nr. 1, 1965, pp. 4—25.

BCU IAȘI / CENTRUL DE CARTE

CAPITOLUL XIII

DIAGRAFIA REZONANȚEI MAGNETICE NUCLEARE

Obiectul diagrafiei rezonanței magnetice nucleare este de a detecta în diverse strate prezența fluidelor libere ce conțin atomi de hidrogen și în acest scop se folosesc proprietățile magnetice ale nucleului de hidrogen.

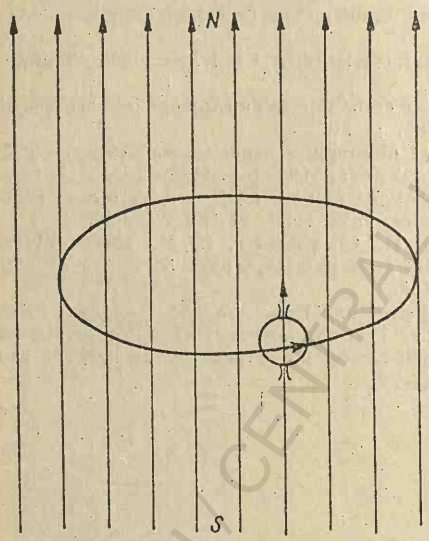


Fig. XIII.1. Momentul cinetic orbital și momentul cinetic propriu.

1. PRINCIPIUL METODEI, DISPOZITIVUL ȘI SCHEMA PRINCIPIALĂ DE MĂSURĂ

Nucleonii (protonii și neutronii) atomilor elementelor nu stau în repaus, ci au atît o mișcare de rotație pe orbită, căreia îi corespunde un moment cinetic orbital* cît și o mișcare în jurul axei lor, căreia îi corespunde un moment cinetic propriu** (v. fig. XIII.1.).

La baza diagrafiei rezonanței magnetice nucleare stă mișcarea de

* Momentul cinetic orbital $\vec{K}$ este produsul dintre impulsul particulei și raza orbitei pe care o descrie. Relația de definiție este $\vec{K} = n \cdot h/2\pi$ (în care: n este numărul cuantic principal, iar h constanta lui Plank $= 6{,}62 \times 10^{-34}$ J.s.).

** Momentul cinetic propriu (spin-s) reprezintă valoarea maximă, exprimată în unități $h/2\pi$, a proiecției momentului cinetic propriu al particulei elementare pe o direcție fixă. Unitatea de măsură se numește *cuantă de moment cinetic* și se notează λ; este egală cu: $\lambda = h/2\pi$.

rotație a protonului în jurul axei sale, care va fi analizată în cele ce urmează.

Rotația protonului în jurul axei proprii se poate efectua atît spre stînga cît și spre dreapta. Oricare ar fi sensul de rotație, aceasta produce un moment cinetic propriu, căruia îi corespunde un moment magnetic μ. Momentul cinetic propriu în fizica nucleară este denumit spin. Corespunzător sensului de rotație a nucleonilor atomilor în jurul axelor lor spinul poate fi de dreapta sau de stînga.

Momentul magnetic propriu* (μ) se exprimă în magnetoni nucleari. Se redau valorile momentului magnetic μ pentru cîteva elemente:

— pentru hidrogen (proton)	= 2,79270
— pentru carbon 13	= 0,70216
— pentru sodiu	= 2,2161
— pentru fosfor	= 1,1305

Cînd intervine un cîmp magnetic exterior, protonul nu se mai rotește normal în jurul axei sale. În această situație, protonul capătă o mișcare de rotație în jurul axei sale la fel ca a unui titirez magnetic, care reacționează față de un cîmp exterior de inducție magnetică B exact cum se comportă un titirez în cîmpul gravitațional. Rotația axei titirezului se numește *precesie* (fig. XIII.2).

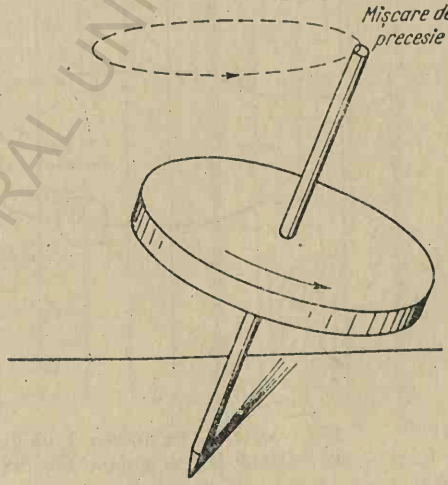


Fig. XIII.2. Mișcarea de precesie.

* Moment magnetic propriu μ este proiecția vectorului momentului magnetic al particulei elementare pe direcția momentului cinetic. Dimensiuni: L^2. În sistemul S.I. unitatea de măsură este amper metrul pătrat ($A \cdot m^2$), care se definește ca $1 \cdot erg/Gs = 10^{-3}\ A \cdot m^2$; în sistemul C.G.S. unitatea de măsură este erg pe gauss (erg/Gs), care se definește $\mu_N = 5{,}05038 \times 10^{-27}\ A \cdot m^2$; în afara sistemelor se numește magneton nuclear sau magnetonul lui Bor (μ_B) și se definește: $\mu_B = 0{,}92731 \times 10^{13}\ A \cdot m^2$.

Frecvența precesiei atomilor de hidrogen, cînd aceștia sînt numai sub acțiunea cîmpului magnetic terestru N este denumită frecvența Larmor.

Frecvența precesiei este legată de cîmpul magnetic N prin relația:

$$F = 0{,}5049 \times 10^{-23} \frac{\mu N}{h} \quad . \qquad \text{(XIII.1)}$$

în care N este intensitatea cîmpului magnetic (în gauss);
μ — momentul magnetic al protonului;
h — constanta lui Plank $= 6{,}6237{,}10^{-34}$ J.s.

Într-un cîmp magnetic de 1 gauss frecvența F pentru hidrogen este 4 257,7 Hz, pentru carbon 13 este 1 070,2 Hz, pentru sodiu este 1,126,2 Hz, pentru fosfor este 1 723,5 Hz etc.

Mișcarea de precisie a protonului se execută în jurul direcției liniilor noului cîmp magnetic B atîta timp cît el este menținut, însă cu condiția ca el să fie mai puternic decît cîmpul magnetic terestru. De aici rezultă o variație a cantității de energie, care depinde numai de un-

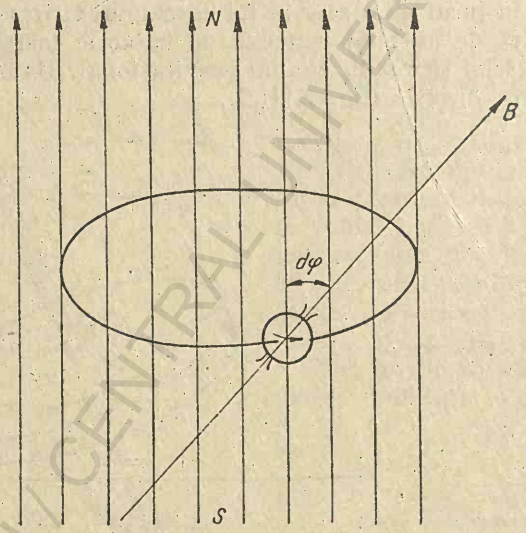


Fig. XIII.3. Înclinarea cîmpului magnetic exterior B față de cîmpul magnetic terestru N.

ghiul $d\varphi$ pe care-l formează axa inițială a momentului cinetic propriu (direcția N—S a cîmpului magnetic terestru) cu direcția cîmpului magnetic exterior B (v. fig. XIII.3).

În natură axele nucleelor atomilor de hidrogen sînt orientate în același sens datorită cîmpului magnetic terestru. Pentru detectarea

prezenței fluidelor ce conțin hidrogen, apă sau hidrocarburi, se introduce în gaura de sondă un generator de cîmp magnetic mult mai puternic decît cel terestru. Cîmpul magnetic artificial afectează spinul tuturor nucleelor atomilor de hidrogen. Cîmpul magnetic artificial este astfel aplicat încît să formeze un unghi $d\varphi$ mai mare de 60° față de cîmpul terestru; în felul acesta, nucleele atomilor de hidrogen vor fi deviate de la poziția lor inițială, obligîndu-le să se rotească la un unghi $d\varphi > 60°$ față de poziția lor naturală și anume în jurul liniilor de forță a noului cîmp creat artificial.

În momentul suspendării cîmpului magnetic artificial, nucleele atomilor de hidrogen, sub influența cîmpului magnetic terestru, revin la poziție naturală de rotație. Această revenire se face după o mișcare de precesie. În timpul mișcării de procesie, cu urmare a variației momentului magnetic, sînt generate mici semnale electrice care sînt recepționate de o bobină receptoare denumită „de sens". Bobina de sens este astfel construită încît să recepționeze numai semnalele electrice a căror frecvență este caracteristică nucleelor de hidrogen.

Schema principială a dispozitivului de fund utilizat în diagrafia rezonanței magnetice nucleare a precisiei libere este prezentată în fig. XIII.4.

Bobina care produce cîmpul magnetic auxiliar B este în același timp și bobina receptoare (de sens). Unghiul dintre direcția liniilor de forță ale cîmpului magnetic terestru și axa bobinei este mai mare de 60° și astfel cele două cîmpuri nu pot fi niciodată coliniare.

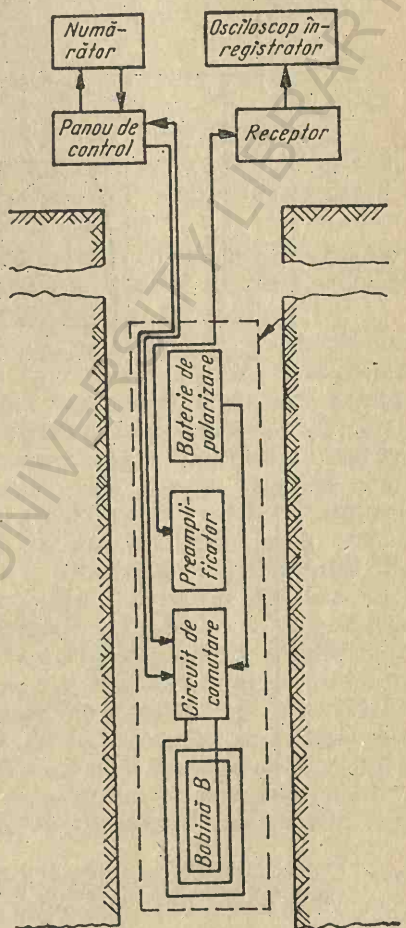


Fig. XII.4. Schema principială de măsură utilizată în diagrafia rezonanței magnetice nucleare cu precesie liberă. Dispozitivul de fund RMN [4].

Măsurarea amplitudinii și formei semnalului se face cu dispozitivul de fund oprit. În primul rînd se polarizează nucleele atomilor de hidro-

gen timp de cinci secunde, după care se întrerupe cîmpul magnetic auxiliar și timp de cîteva secunde se înregistrează semnalul. În fig. XIII. 5 se prezintă forma unui semnal al precesiei libere*. Pentru a

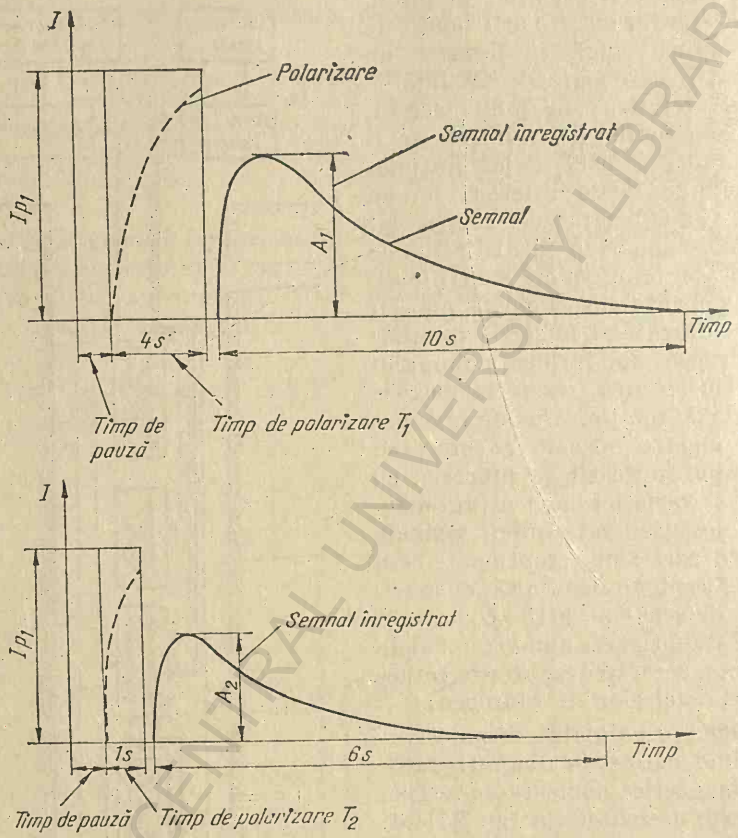


Fig. XIII.5. Forma semnalului precesiei libere pentru atomii de hidrogen din moleculele de petrol la timpi diferiți de polarizație ($T_1 = 4$ s; $T_2 = 1$ s); $A_1 > A_2$.

reduce influența precesiei libere a atomilor de hidrogen din fluidul de foraj, în special în cazul cavernelor, se adaugă o mică cantitate de oxid de fier în noroi. În felul acesta, semnalul recepționat provine numai din

* Prin precesie liberă se înțelege precesia nucleelor de hidrogen din moleculele de apă liberă și din molculele hidrocarburilor.

fluidele conținute în formațiuni. Bobina receptoare este acordată pentru frecvența protonilor, care este de aproximativ 2 000 Hz pentru intensitatea cîmpului magnetic natural a cărui valoare este de circa 0,5 Oersted.

2. INTERPRETAREA

Relaxarea termică* se caracterizează prin două constante:

1. Constanta relaxării longitudinale, care se determină prin măsurarea semnalului precesiei libere a aceloraşi nuclee prima dată un timp mai lung şi a doua oară un timp mai scurt;

2. Constanta relaxării transversale, care se determină prin măsurarea semnalului precesiei libere la intervale diferite de timp, cînd nucleele au fost polarizate la fel (acelaşi interval de timp).

Constanta relaxării transversale se mai numeşte şi *constanta timpului de descreştere a semnalului*. Această constantă este de ordinul secundelor.

În vederea interpretării diagrafiilor rezonanţei magnetice nucleare prin precesie liberă se construieşte o curbă a amplitudinilor semnalelor recepţionate în două situaţii: în prima etapă se polarizează nucleele atomilor de hidrogen timp de 4 secunde, după care se măsoară amplitudinea semnalului; în etapa a doua se polarizează aceleaşi nuclee timp de o secundă, după care se măsoară iar amplitudinea noului semnal.

Nucleele atomilor de hidrogen din apa liberă se polarizează mai repede decît nucleele atomilor de hidrogen din petrol. Ca urmare, în cazul apei amplitudinile măsurate după timpi diferiţi de polarizare vor fi aproximativ egale. În cazul petrolului, deoarece atomii de hidrogen se polarizează într-un timp mai îndelungat, amplitudinile măsurate după timpii diferiţi de polarizare vor fi diferite (v. fig. XIII.5).

În fig. XIII.6 se prezintă o diagrafie de rezonanţă magnetică nucleară prin precesie liberă prelucrată. Pe această diagrafie, intervalul cu petrol se recunoaşte prin faptul că amplitudinile semnalelor măsurate după timpi diferiţi de polarizare sînt diferite (cazul intervalului situat sub adîncimea de 1 900 m).

Intervalele cu apă se recunosc prin faptul că amplitudinile semnalelor, măsurate după timpi diferiţi de polarizare, sînt aproximativ egale, diferind într-o măsură oarecare numai după cum apa liberă este conţinută în roci cu permeabilitate mai mare sau mai mică.

În dreptul argilelor nu se observă fenomene de rezonanţă magnetică nucleară.

---

* Timpul de revenire a protonilor la axele lor naturale de rotaţie N—S se numeşte *timp de relaxare termică*. Timpul de relaxare termică depinde de natura legăturilor chimice din molecule.

Raza de investigare a dispozitivului este pînă la 0,3 m. Ca urmare, în majoritatea cazurilor, se va investiga zona spălată.

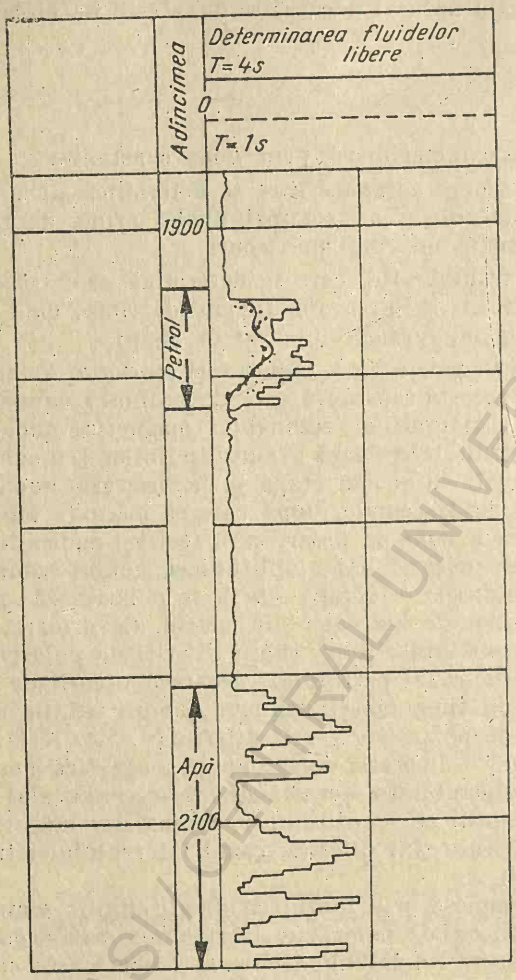


Fig. XIII.6. Diagrafie de rezonanță magnetică nucleară prin precesie liberă, prelucrată [4].

3. DOMENIUL DE APLICABILITATE

Diagrafiile magnetice nucleare se folosesc pentru detectarea stratelor cu petrol și pentru delimitarea stratelor cu apă.

Inconvenientul acestor măsurători constă în raza mică de investigare a dispozitivului.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BIBLIOGRAFIE

1. Brown, R. J. S., Gamson, B. W. **Nuclear Magnetism Logging** Trans. Soc. Petr. Eng., Vol. 219, 1960, p. 199.
2. Hull, P., Coolidge, J. E. **Field Examples of Nuclear Magnetism Logging.** Tulsa: 1st Annual Meeting SPWLA, May. 26—27, 1960.
3. Coolidge, J. E., Gamson, B. W. **Present Status of Nuclear Magnetism Logging.** Houston: Formation Evaluation Symposium, Nov., 21—22, 1960, p. III. 9.
4. Pirson, J. Sylvain. **Handbook of Well log Analysis, 1963.**

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CAPITOLUL XIV

DIAGRAFII OBȚINUTE PRIN MĂSURAREA INTENSITĂȚII CURENTULUI ELECTRIC

Sînt două categorii de metode de măsurare a intensității curentului electric, după cum electrozii dispozitivelor sînt sau nu ecranați.

1. PRINCIPIUL METODELOR FOLOSIND DISPOZITIVE CU ELECTROZI NEECRANAȚI

Diagrafiile de intensitate a curentului electric folosind dispozitive cu electrozi neecranați constau în măsurarea rezistenței de punere la pămînt a electrodului de curent din gaura de sondă A, cînd acesta trece prin dreptul stratelor. Conform legii lui Ohm, printr-un conductor electric la capetele căruia se aplică o diferență de potențial U constantă va circula un curent I de intensitate constantă, atîta timp cît rezistența circuitului rămîne constantă:

$$I = \frac{U}{R} \qquad \text{(XIV.1)}$$

Circuitul de măsură se compune din mai multe rezistențe:

— o serie de rezistențe constante și anume: rezistența cablului *1*, rezistența interioară a sursei de curent E, rezistența de punere la pămînt a prizei B, rezistența aparatelor de măsură și înregistrare G_i și a conexioanelor *2*. Suma rezistențelor constante enumerate mai sus se notează cu R_k;

— o rezistență variabilă R_v, care este reprezentată prin rezistența de punere la pămînt a electrodului A din gaura sondei (v. fig. XIV.1*a*).

Introducînd cele două categorii de rezistențe în expresia XIV.1 aceasta devine:

$$I = \frac{U}{R_k + R_v} \qquad \text{(XIV.2)}$$

Deci, atîta timp cît U şi R_k nu variază în timpul operaţiei, curentul I care circulă prin electrodul de măsură A va depinde numai de rezistenţa de punere la pămînt a acestuia, respectiv de rezistenţa rocilor prin dreptul cărora trece electrodul A. Pentru ca diagrafiile să fie

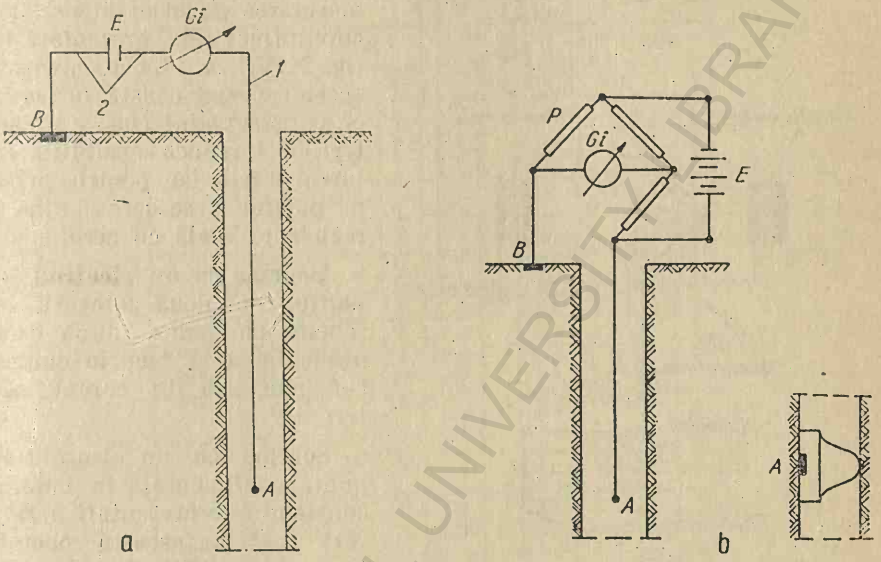


Fig. XIV.1. Schemă pentru măsurarea intensităţii curentului electric. Alimentare în curent continuu:
a — schema cu un electrod; *b* — schema cu un electrod şi punte.

concludente trebuie ca $R_k < R_v$, deci rezistenţele enumerate la punctul *a* să aibă valori ohmice cît mai reduse; rezistenţa de punere la pămînt a prizei B este satisfăcătoare cînd este egală cu zero.

1.1. Dispozitive şi scheme de măsură

Dispozitivul de măsură este un simplu electrod A, plasat la partea inferioară a cablului, confecţionat obişnuit din plumb (v. fig. XIV.1 şi 2), care poate fi liber sau presat pe peretele găurii sondei*. Rareori se folosesc dispozitive cu doi electrozi**.

---

* Cînd electrodul A este presat pe peretele găurii sondei, metoda se numeşte a *contactelor alunecătoare* şi a fost concepută de A.I. Semeonov şi O.K. Vladimirov [1].
** Dispozitivul cu doi electrozi nu se mai utilizează pentru că în cazul stratelor conductive subţiri şi înclinate sau cînd noroiul este neomogen (zone conductive alternînd cu zone rezistive) apar vîrfuri fictive pe diagrafii.

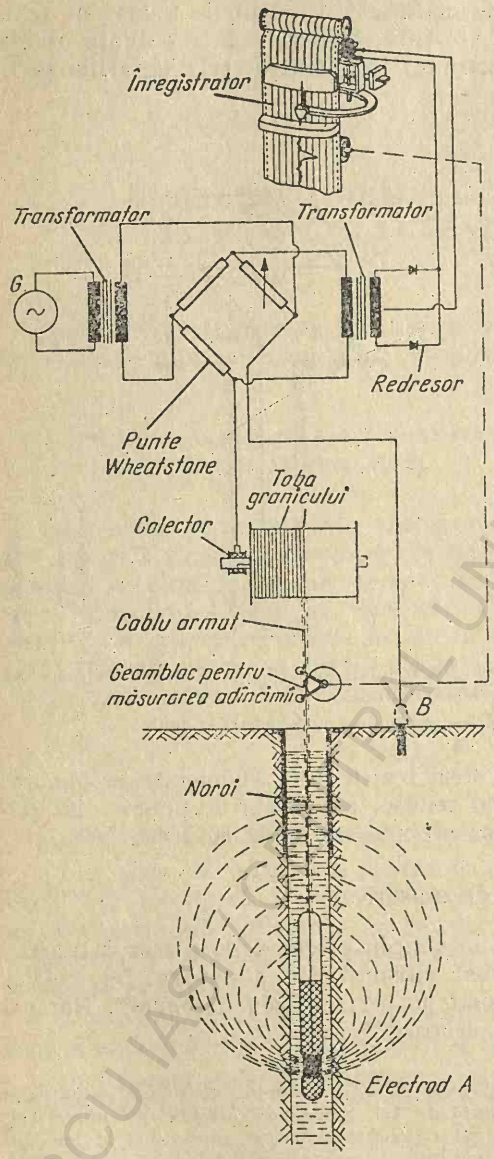


Fig. XIV.2. Schemă de măsură a rezistivităţii aparente prin măsurarea curentului utilizînd un electrod şi punte. Alimentare, în curent alternativ.

Se folosesc două scheme de măsură: cu un electrod şi cu un electrod şi punte.

Schema cu un electrod pentru măsurarea variaţiei intensităţii curentului I este prezentată în fig. XIV.1 *a*. Inconvenientul acestei scheme constă în aceea că rezistenţa interioară a bateriilor E reduce sensibilitatea înregistrării, iar pentru priza de pămînt B se cere să aibă o rezistenţă egală cu zero.

Scheme cu un electrod şi punte. Sînt două categorii de scheme cu punte, după cum alimentarea se face în curent continuu sau în curent alternativ.

a. Schema cu un electrod şi punte — alimentate în curent continuu este prezentată în fig. XIV 1 *b* . La această schemă se pun condiţii mai puţin pretenţioase pentru rezistenţa interioară a bateriilor E şi pentru rezistenţa de punere la pămînt a prizei B, deoarece în cazul unei rezistenţe suficient de mare a punţii se reduce considerabil influenţa rezistenţei de punere la pămînt a prizei B şi a rezistenţei interne a bateriilor, respectiv a rezistenţei R_k.

BCU IAŞI

b. Schema cu un electrod și punte — alimentare în curent alternativ este prezentată în fig. XIV.2. Curentul alternativ furnizat de generatorul *G* ajunge la electrodul de măsură *A* prin intermediul unui cablu monoconductor și în continuare la priza de punere la pământ *B*. În

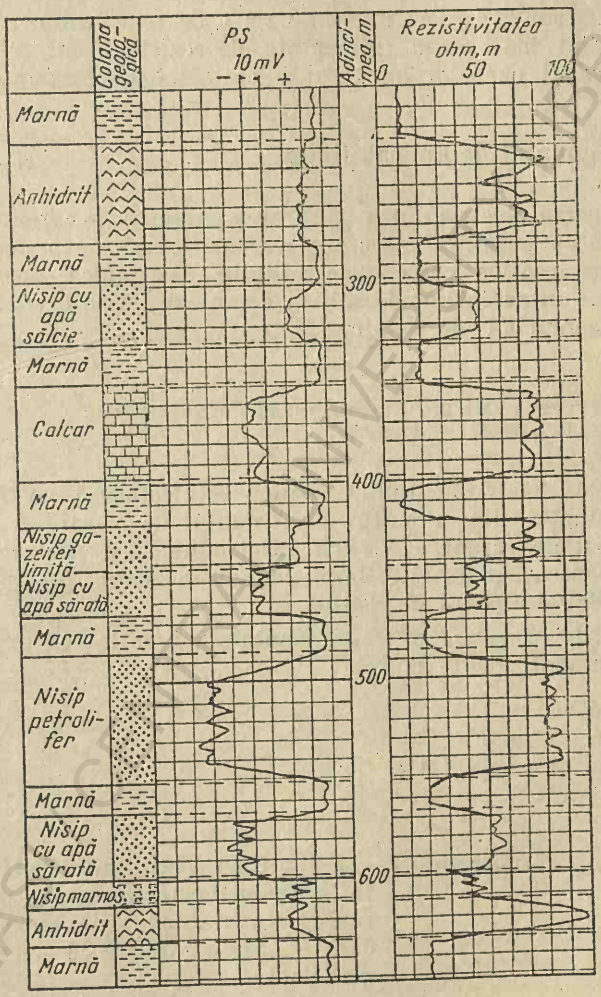


Fig. XIV.3. Diagrafie pentru măsurarea intensității curentului electric. Schemă cu un electrod și punte. Alimentare în curent continuu [3].

felul acesta, se măsoară rezistența ohmică dintre electrozii A și B prin intermediul punții Wheatstone. Folosind schema din fig. XIV.2 se înregistrează și potențialul natural.

În fig. XIV.3 este reprezentată o diagrafie înregistrată cu dispozitivul cu un electrod și punte, cu alimentare în curent alternativ, într-o gaură de sondă care a traversat o serie de roci sedimentare. Limitele stratelor sînt mai puțin influențate de rezistența stratelor adiacente, decît în cazul curbelor înregistrate cu dispozitive gradiente.

1.2. Domeniul de aplicabilitate

Investigarea electrică prin măsurarea intensității curentului folosind dispozitive cu electrozi neecranați se utilizează de preferință pentru evidențierea rocilor cu conductibilitate electronică, respectiv pentru evidențierea minereurilor de sulfuri complexe, minereurilor auro-argintifere, minereurilor de Fe etc. [2].

2. PRINCIPIUL METODEI FOLOSIND DISPOZITIVE CU ELECTROZI ECRANAȚI

În această metodă, studiul rocilor se efectuează pe baza determinării rezistenței din circuitul electrodului de măsură A plasat între doi electrozi de ecranare E. Prin electrodul A și electrozii E circulă curenți de aceeași polaritate, împiedicîndu-se astfel dispersarea curentului emis de electrodul de măsură A.

Cercetările teoretice și experimentale au arătat că rezistența electrodului ecranat ideal R_A^i este:

$$R_A^i = \frac{\left(1+\frac{i_e}{i_A}\right)\rho_e}{f\left(\frac{L_e}{d_e}\right)L_e} = \frac{1}{K_e}\rho_e \qquad \text{(XIV.3)}$$

în care ρ_e reprezintă — așa-numita rezistivitate efectivă a mediului neomogen cercetat egală, în ohm.m, cu rezistivitatea mediului omogen fictiv în care R_A are o valoare cu a mediului omogen dat;

i_A și i_e — intensitățile curenților care trec prin electrodul de măsură A și prin electrozii de ecranare E;

L_e — lungimea totală a electrozilor A și E;

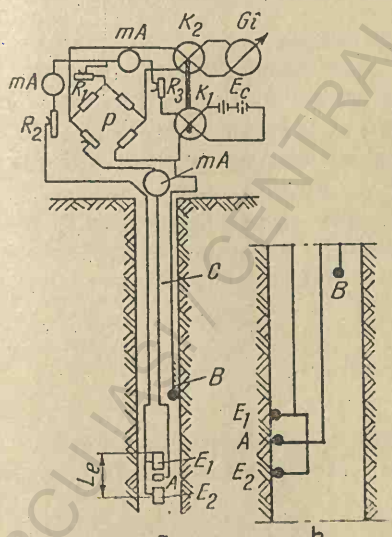
$f(L_e/d_e)$ — o mărime fără dimensiuni, funcție a raportului dintre lungimea electrozilor L_e și diametrul lor d_e;

K_c — contracția dispozitivului ecranat; cînd $i_A = i_e$, atunci $K_e = f(L_e/d_e)\ L_A$ (unde L_A este lungimea electrodului A).

În condiții reale, cînd dispozitivul de măsură este introdus în gaura de sondă plină cu fluid de foraj, rezistența electrodului A se compune din R_A^i și rezistența de contact R_c care apare la limita dintre metalul din care este confecționat electrodul A și fluidul de foraj. Această rezistență de contact suplimentară apare din cauza depunerii produselor gazoase și solide de electroliză pe suprafața electrodului și depinde de natura metalului din care este confecționat electrodul, de densitatea, frecvența și sensul curentului care alimentează dispozitivul.

2.1. Dispozitive și scheme de măsură

În fig. XIV. 4 *a* este prezentat dispozitivul de măsură la care electrodul A împreună cu electrozii de ecranare E sînt montați pe un cilindru din material izolant, al cărui diametru este cît mai apropiat de agăurii sondei. Rezistența circuitului A se măsoară utilizînd o schemă în punte.



În fig. XIV.4 *b* este prezentat dispozitivul de măsură la care electrodul A împreună cu electrozii de ecranare E sînt montați pe o patină din material izolant, care este presată prin intermediul unui arc pe peretele găurii sondei. Ca și în cazul precedent, măsurarea rezistenței circuitului A se realizează cu ajutorul unei scheme în punte.

Singurul element variabil din schema folosită, atît în primul caz cît și în al doilea caz, este rezistența de punere la pămînt a electrodului A.

Fig. XIV.4. Schemă de măsură a rezistivității aparente prin măsurarea curentului electric utilizînd electrozi ecranați:

a — electrodul de curent A și cei de ecranare E_1E nu sînt presați pe peretele găurii de sondă; *b* — electrozii A, E_1, E_2 sînt presați pe peretele găurii sondei.

Caracteristicile dispozitivelor de măsură folosind electrozi ecranați sînt: lungimea totală a dispozitivului $E_1E_2=L_e$; lungimea electrodului de măsură $A=L_A$; punctul de înscriere A; constanta dispozitivului K;

$$K=K_e+K_c=f(L_e/d_e)L_A+K_c \qquad \text{(XIV.4)}$$

în care K_c este constanta de contact, restul notațiilor fiind aceleași ca în formula XIV.3.

2.1. Domeniul de aplicabilitate

Metoda descrisă se folosește pentru detectarea substanțelor minerale utile solide, avînd conductivitate electronică mare și medie. Metoda este descrisă pe larg de V.N. Dahnov [2].

BIBLIOGRAFIE

1. Semenov, A. I. și Vladimirov, O. K. **Karotaj rudnih skvajin metodom skolziașcih kontaktov**, Gosgeolizdat, 1947.
2. Dahnov, V. N. **Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă**. București, Editura tehnică, 1961, pp. 222—223.
3. **Portable Electro-Logger type EI-1500**. Eastman International Company G.M.B.H., In Hanover, 1966.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CAPITOLUL XV

TERMOMETRIA, CAVERNOMETRIA, PANDAJMETRIA

1. TERMOMETRIA

Încă de la începutul secolului al XVIII-lea, geologii s-au preocupat de studiul căldurii interne a Pămîntului, făcînd măsurători în mine, puțuri, tuneluri, izvoare termale și sonde, pentru determinarea proprietăților termice ale rocilor, pentru studierea cîmpului termic natural al pămîntului și a cîmpurilor termice locale, precum și pentru determinarea unor probleme de interes practic.

1.1. Proprietățile termice ale rocilor

Capacitatea — unui mediu de a transmite ori de a absorbi energia termică se caracterizează după conductivitatea termică λ (respectiv rezistivitatea termică), căldura specifică c și difuzibilitatea termică a.

Conductivitatea termică λ reprezintă proprietatea unui mediu de a transmite energia termică moleculelor.

Conductivitatea termică se caracterizează prin cantitatea de căldură Q care curge într-un timp dt, printr-un mediu de formă paralelipipedică avînd lungimea l și existînd o diferență de temperatură $t_1 - t_2$ între suprafețele extreme transversale S:

$$\lambda = \frac{dQ}{(t_2 - t_1)\frac{S}{l}\,dt} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}\cdot{}^\circ\text{C oră}}\right] \qquad \text{(XV.1)}$$

În practica cercetărilor geofizice a sondelor se obișnuiește a se folosi rezistivitatea termică ξ, care este inversul conductivității termice:

$$\xi = \frac{1}{\lambda} \qquad \text{(XV.2)}$$

Rezistivitatea termică a rocilor variază în funcție de densitatea, umiditatea, permeabilitatea, natura fluidului saturant, temperatura și structura rocilor [1].

Rezistivitatea termică a rocilor scade pe măsură ce crește densitatea, umiditatea și permeabilitatea lor.

În legătură cu dependența rezistivității termice a rocilor de natura fluidului saturant, se menționează că rezistivitatea rocilor crește de circa patru ori cînd porii acestora sînt saturați cu petrol, comparativ cu rezistivitatea pe care ele o au cînd sînt saturate cu apă.

Rezistivitatea rocilor uscate crește foarte puțin cînd temperatura acestora crește, pe cînd rezistivitatea rocilor umede scade cu creșterea temperaturii (deoarece rezistivitatea termică a apei scade cu creșterea temperaturii).

Rezistivitatea termică a rocilor este mai mare în direcția perpendiculară pe stratificație, decît în direcția paralelă cu stratificația (fenomenul de anizotropie).

Datorită faptului că rocile și mineralele au rezistivități termice diferite se fac următoarele precizări:

— rocile uscate au rezistivitate termică mai mare decît a rocilor umede, iar din cadrul rocilor umede cele permeabile au rezistivitatea termică cea mai scăzută;

— dintre substanțele minerale utile, cărbunii minerali au cea mai mare rezistivitate termică;

— rezistivitatea termică a petrolului se deosebește foarte puțin de aceea a rocilor înconjurătoare;

— rezistivitatea termică a metalelor este mult mai mică decît a rocilor înconjurătoare.

Căldura specifică c reprezintă cantitatea de căldură necesară unității de masă dintr-o substanță pentru a-și ridica temperatura cu 1°C, în condițiile date substanța rămînînd în aceeași fază. Se exprimă în kcal/kg°C sau în kJ/kg°K [3]. Căldura specifică a rocilor și a substanțelor minerale utile variază în limite restrînse (0,15—0,5 kcal/kg°C). Căldura specifică crește cu creșterea saturației cu apă a porilor.

Coeficientul de difuzibilitate termică a reprezintă viteza de variație a temperaturii unității de volum a mediului în unitatea de timp. Relația matematică prin care se definește coeficientul de difuzibilitate termică este

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \delta} = \frac{1}{c\xi\delta} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{oră}}\right] \qquad \text{(XV.3)}$$

Difuzibilitatea termică a rocilor variază în funcție de densitatea δ, umiditate, natura fluidului saturant, temperatura și stratificația rocilor.

Difuzibilitatea termică crește o dată cu creșterea greutății specifice a rocilor; de asemenea crește o dată cu creșterea umidității acestora, datorită reducerii rezistivității lor termice.

Difuzibilitatea termică a rocilor petrolifere este mai mare decît a celor acvifere, întrucît rezistivitatea termică a petrolului este mai mare decît a apei (această diferență se diminuează într-o măsură oarecare datorită valorilor mai reduse ale densității și căldurii specifice a petrolului în comparație cu apa).

Difuzibilitatea termică crește cu creșterea temperaturii rocilor; de aceea o dată cu creșterea temperaturii crește rezistivitatea termică și căldura specifică a acestora.

Difuzibilitatea termică a rocilor este mai mare de-a lungul stratificației decît pe direcția perpendiculară pe stratificație.

1.2. Cîmpuri termice

Măsurătorile de temperatură în sonde stabilesc o creștere sau o descreștere a temperaturii mediului traversat de foraje datorită cîmpului termic natural al Pămîntului și cîmpurilor termice locale.

Cîmpul termic natural al Pămîntului este caracterizat prin fluxul termic ce se propagă din centrul său la suprafață.

Cercetarea cîmpului termic natural al Pămîntului se face în sonde la care noroiul de foraj a preluat temperatura rocilor traversate, deci în sonde care au stat în repaus un timp oarecare (orientativ mai mare de 12 ore).

Practic, se înregistrează un profil care redă variațiile de temperatură ale rocilor traversate de gaura de sondă, care se numește *geotermogramă* sau *termogramă*, cum este denumită în mod curent.

În fig. XV.1 este prezentată o geotermogramă. Înclinarea curbei, care redă variația temperaturilor naturale ale rocilor cu adîncimea, se caracterizează prin unghiul ei de înclinare față de scara adîncimilor. Tangența unghiului α de înclinare a termogramei determină mărimea gradientului geometric G_g:

$$\lg \alpha = \frac{dt}{dz} = G_g \qquad \text{(XV.4)}$$

Gradientul geotermic G_g este o mărime care redă intensitatea de creștere a temperaturii în °C, cînd se coboară pe verticală cu 100 m spre adîncul Pămîntului și se exprimă prin relația

$$G_g = 100 \frac{t_2 - t_1}{H_2 - H_1} \ [°C/100 \text{ m}] \qquad \text{(XV.5)}$$

în care t_2 și t_1 sînt temperaturile corespunzătoare adîncimilor H_2 și H_1.

Mărimea inversă a gradientului geometric este *treapta geotermică*, definită ca distanța, în metri, măsurată pe verticală spre interiorul Pă-

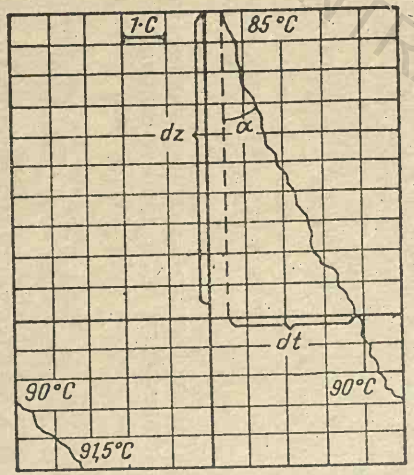
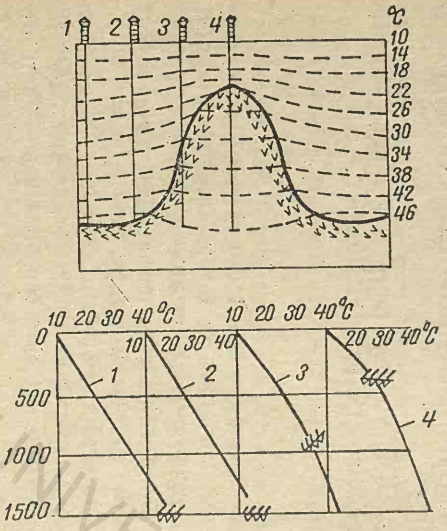


Fig. XV.1. Geotermogramă.



---- Intersecția suprafeței izotermice cu planul desenului

——— Termograme. Nr. termogramei corespunde cu nr. sondei indicat pe profil

ɯɯɯ Semn pentru schimbarea treptei geotermice ca urmare a intersecției masivului de sare.

Fig. XV.2. Caracterul distribuției cîmpului termic și aspectul termogramelor în prezența domurilor cu sare. Suprafețele izotermice sînt trasate la fiecare 4°C.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

mîntului, pentru care are loc o variație de temperatură de 1°C. Se exprimă prin relația

$$T_g = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} \ [m/°C] \qquad (XV.6)$$

Gradientul geometric depinde de doi factori: densitatea curentului de căldură q și rezistivitatea termică a rocilor, care reflectă compoziția lor litologică:

$$G_g = q\xi \qquad (XV.7)$$

Dependența gradientului geotermic de densitatea curentului de căldură q oferă posibilitatea de a cerceta structurile îngropate care au proprietăți termice contrastante față de cele ale depozitelor înconjurătoare, după datele obținute prin studiul temperaturilor în sonde care nu deschid structurile respective.

În general, studiul variației densității fluxului de căldură, respectiv a variației treptei geotermice, poate fi utilizat la prospectarea structurilor îngropate favorabile acumulării zăcămintelor de petrol.

În fig. XV.2 este prezentată variația gradientului geotermic în dreptul unui masiv de sare. Din analiza variației gradientului geotermic, se constată că în dreptul masivului de sare G_g scade, indicînd o anomalie termică minimală, în timp ce în depozitele acoperitoare ale domului de sare se observă creșterea gradientului — respectiv o apropiere a suprafețelor izoterme de pe suprafața solului [5]. Trecerea de la mediile avînd rezistivitate termică diferită este clar demarcată în reprezentarea gradientului termic și a geoizotermelor.

Diferența între rezistivitatea termică a unor roci și rezistivitatea termică a sării este în majoritatea cazurilor apreciabilă și se exprimă de obicei prin raportul ξ_1/ξ_2 (în care ξ_1 este rezistivitatea termică a rocii respective și ξ_2 — rezistivitatea termică a sării).

În fig. XV.3 se prezintă un grafic care ilustrează variația gradientului geotermic determinat pentru Platforma Moesică [2].

În fig. XV.4 se arată schematic modul de propagare a curenților de căldură în zonele anticlinale și sinclinale. În zonele anticlinale crește densitatea curentului de căldură, deoarece la curentul de căldură ascendent pe verticală, se adaugă și curenții de căldură suplimentari, care circulă în direcția stratificației; curenții suplimentari de căldură sînt determinați de rezistivitatea termică scăzută a rocilor pe direcția de stratificație (anizotropie termică), sau provin din transportul suplimentar de căldură prin convecție de către apele care circulă în stratele permeabile. În zonele sinclinale scade densitatea curentului de căldură, din considerentele arătate mai sus. Ca urmare a fenomenelor arătate, cîmpul termic natural al Pămîntului va fi maxim în zonele anticlinale și minim în zonele sinclinale.

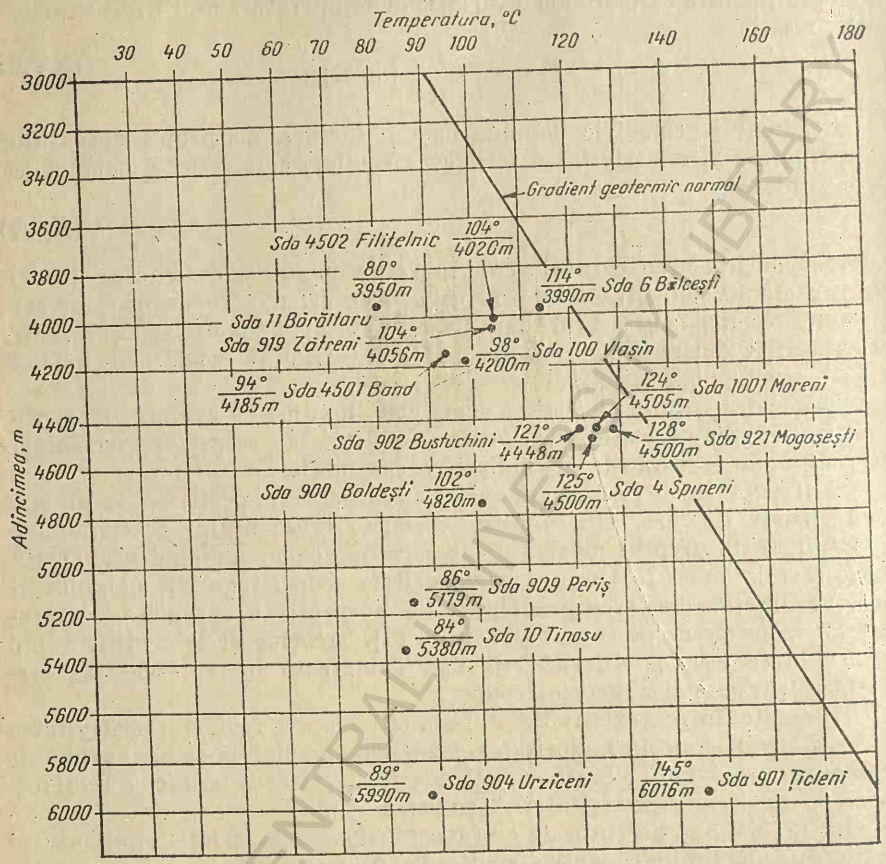
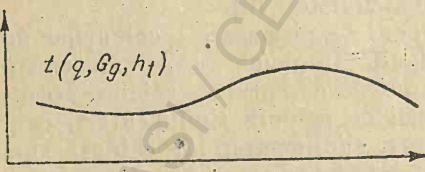


Fig. XV.3. Grafic reprezentînd variația gradientului geotermic în Platforma Moesică.



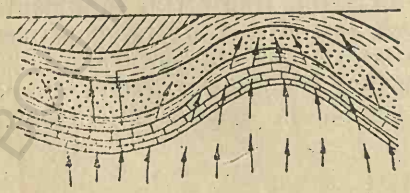


Fig. XV.4. Modul de propagare a curenților de căldură în zonele anticlinale și sinclinale.

Datele cercetărilor asupra variației cîmpului termic natural al Pămîntului servesc pentru studiul structurilor îngropate din regiunile cu gheţuri veşnice. În zonele anticlinale, grosimea gheţii este minimă.

Pe baza studierii variației cîmpului termic natural al Pămîntului, s-a ajuns la următoarele concluzii:

— Gradientul geotermic are o valoare minimă în regiunile de afloriment ale rocilor vechi cristaline. De exemplu, depozitele precambriene din Scutul Fino-Scandinavic (în Peninsula Kola, la Moncetundra) au valoarea gradientului geotermic de 0,598°C/100 m pînă la adîncimea de 450 m. În masivul cristalin Azovo-Podolosk (Krivoi-Rog) s-au obţinut valori ale gradientului geotermic mediu de 0,89°C/100 m. În Canada, în regiunea Marilor Lacuri, valoarea gradientului geotermic ajunge la 0,73°C/100 m. Valori scăzute ale gradientului geotermic s-au semnalat în masivele cristaline din Africa de Sud (pînă la 0,63°C/100 m). În România pînă în prezent cel mai scăzut gradient geotermic s-a înregistrat în depozitele cretacice din jurul oraşului Călăraşi (circa 1°C/100 m);

— Gradientul are valori crescute în ţinuturile de platformă şi în zonele cutate în timpul mişcărilor orogenice mezozoice şi paleozoice. În aceste regiuni, gradientul geotermic variază de la 0,76°C/100 m pînă la 3°C/100 m. În România, în regiunea Platformei Moesice gradientul geotermic variază în medie între 2 şi 3°C/100 m (exceptînd regiunea Călăraşi);

— Gradientul geotermic are valorile cele mai mari în regiunile cutărilor cainozoice şi mezozoice tinere. În aceste regiuni, valoarea gradientului geotermic creşte brusc şi variază de obicei între 2,5°C/100 m şi 20°C/100 m sau chiar mai mult.

În România, valorile cele mai ridicate ale gradientului geotermic au fost înregistrate în fundamentul depresiunii Panonice şi anume de 6—8°C/100 m, în jurul regiunii Oradea.

Cîmpurile termice locale se datorează unor procese fizico-chimice endotermice sau exotermice naturale sau create în mod artificial, pe diverse intervale ale profilului găurii de sondă.

— Cîmpurile termice locale naturale ce se întîlnesc în găurile de sondă se datoresc unor procese fizico-chimice care se observă în dreptul unor roci la contactul cu fluidul de foraj sau la contactul acestora cu rocile înconjurătoare. Cele mai pregnante cîmpuri termice locale naturale sînt create în prezenţa rocilor gazeifere şi petrolifere, depozitelor halogene, sulfurilor şi stratelor de cărbuni.

Stratele petrolifere şi gazeifere se disting pe profilele de temperatură prin anomalii de temperaturi scăzute. Aceasta se explică prin fenomenul de detentă adiabatică a gazelor (efectul de răcire Joule-Thompson). La sondele în foraj, detenta gazelor se produce în cazul cînd în momentul străbaterii lor, presiunea hidrostatică a noroiului de foraj, la nivelul

stratului, este egală sau sensibil mai mică decît a gazelor. În sondele de exploatare (de gaze sau petrol), din cauza procesului de expansiune a gazelor, stratele cu hidrocarburi se disting întotdeauna prin anomalii de temperaturi scăzute, deoarece prin procesul de exploatare, presiunea de zăcămînt este mai mare decît presiunea hidrostatică din gaura de sondă.

În fig. XV.5 sînt reprezentate două termograme ipotetice pentru sonde care străbat un strat gazeifer [6]. Mai jos de stratul gazeifer, pe porțiunea *ab*, curbele de temperatură sînt apropiate ca aspect de termogramele obținute în dreptul stratelor negazeifere. Un strat gazeifer subțire se distinge pe o termogramă printr-o anomalie continuă de temperatură scăzută (cazul din fig. XV.5 *a*), iar în cazul unui strat gros printr-o anomalie diferențială de temperatură scăzută (porțiunea *cc'* din fig. XV.5, *b*).

Deasupra anomaliei de temperatură scăzută se observă o creștere treptată a temperaturii (porțiunea *c'd*) din cauza încălzirii gazelor de către rocile înconjurătoare. Mai sus de punctul *d*, temperatura gazelor încălzite în porțiunile inferioare ale sondei va fi mai înaltă decît temperatura rocilor situate mai sus, din care cauză termograma se va plasa mai la

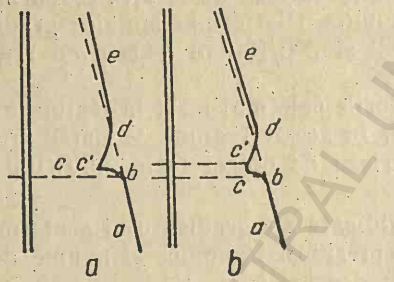


Fig. XV.5. Termograme ipotetice pentru sonde care străbat strate gazeifere; *a* — cazul stratelor subțiri; *b* — cazul stratelor groase.

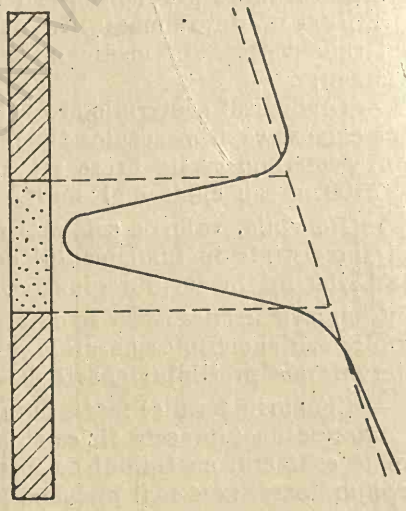


Fig. XV.6. Anomalie datorită temperaturii scăzute din dreptul unui strat gazeifer (Gaura de sondă este umplută cu noroi de foraj).

dreapta decît curba temperaturilor înregistrată în lipsa stratului gazeifer (linia desenată punctat).

În condițiile reale, cînd gaura de sondă conține noroi de foraj, din cauza scăderii convecției și schimbului redus de căldură, anomaliile de căldură sînt reprezentate ca în fig. XV.6, în care limitele stratului sînt mai bine conturate.

Cîmpurile termice naturale locale datorate zăcămintelor de sulfuri se creează în urma reacțiilor de oxidare* care au loc în special la suprafața minereurilor. Căldura ce se degajă ridică temperatura acestora, res-

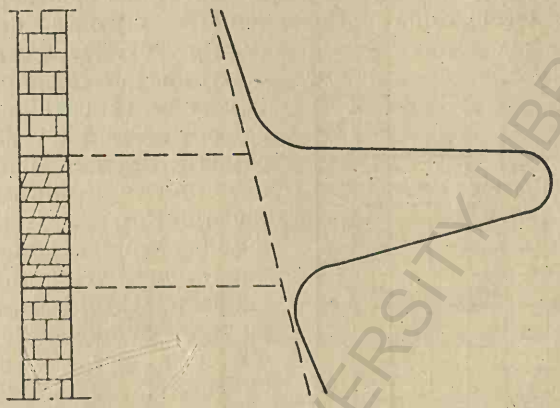


Fig. XV.7. Anomalie datorită creșterii temperaturii din dreptul unui zăcămînt conținînd sulfuri complexe.

pectiv a rocilor înconjurătoare și a noroiului de foraj. Ca urmare, pe termograme zăcămintele de sulfuri sînt evidențiate prin anomalii crescute de temperatură (v. fig. XV.7).

Cîmpurile termice naturale locale datorate stratelor de cărbuni se produc în urma oxidării cărbunilor: pe termograme acestea sînt evidențiate, ca și sulfurile, prin anomalii crescute de temperatură. În cazul stratelor subțiri de cărbuni, intensitatea proceselor de oxidare fiind redusă, acestea nu pot fi clar evidențiate pe termograme.

Cîmpurile termice naturale locale datorate prezenței depozitelor de sare gemă sau silvină sînt evidențiate pe termograme prin anomalii scăzute de temperatură, deoarece atît starea gemă cît și silvina absorb căldura din noroiul de foraj.

Cîmpurile termice artificiale locale apar datorită 1) introducerii noroiului de foraj în gaura de sondă a cărui temperatură este diferită de aceea a rocilor traversate și 2) reacției exotermice a prizei cimentului (cimentarea coloanelor).

Cîmpurile termice artificiale locale datorate noroiului de foraj se explică prin variația temperaturii acestuia într-un anumit interval de timp, variație condiționată de difuzibilitatea termică a rocilor. Rocile

* Oxidarea este o reacție exotermică.

care au rezistivitate termică distinctă, respectiv diferite valori de difuzibilitate termică, se remarcă pe termograme prin anomalii termice.

— Cîmpurile termice artificiale locale datorate reacției exotermice a prizei de ciment, care are loc după cimentarea coloanelor, sînt reprezentate pe termograme prin anomalii crescute de temperatură (v. fig. XV.8). Ca urmare, se poate determina pe termograme nivelul pînă la care s-a ridicat cimentul în spatele coloanei. Avînd în vedere că, în timp, căldura degajată datorită reacției exotermice este difuzată în mediul înconjurător, s-a stabilit, pe baza datelor experimentale, că se poate determina nivelul pînă la care s-a ridicat cimentul în spatele coloanelor pe termograme pînă la maximum 72 ore de la începerea operațiunii de cimentare.

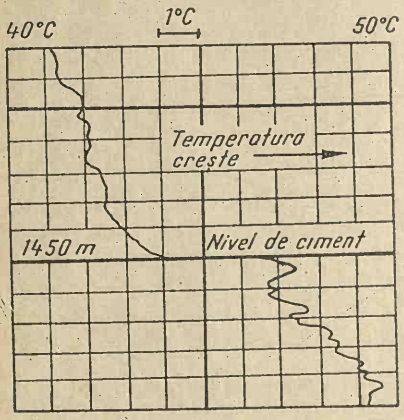


Fig. XV.8. Termogramă pe care se evidențiază nivelul pînă la care s-a ridicat cimentul în spatele coloanei.

În cazul cînd se urmărește cunoașterea temperaturii reale în gaura de sondă, este necesar ca sonda să stea un anumit timp în repaus, pentru ca noroiul de foraj să preia temperatura rocilor înconjurătoare. Timpul de menținere a sondei în repaus depinde de diametrul acesteia. Pe baza datelor experimentale se pot face următoarele recomandări de menținere a găurii de sondă în repaus, în funcție de diametrul acesteia, pentru a se asigura determinarea unei temperaturi cît mai aproape de realitate: pentru un diametru de $7\,^3/_4$ in, timpul indicat este de 12—24 ore; pentru un diametru de $9\,^3/_4$ in, timpul indicat este de 12—48 ore; pentru diametrele $11\,^3/_4$ și $13\,^3/_4$ in, timpul indicat este de 1—3 zile respectiv 2—4 zile [1].

Determinarea proprietăților termice ale rocilor străbătute de foraje pe baza studiului termogramelor prezintă o serie de dificultăți, dintre care amintim: temperaturile nu se măsoară în rocile cercetate, ci în noroiul de foraj; diametrul găurii de sondă nu se menține constant; termogramele înregistrate în anumite situații sînt deformate.

Dintre anomaliile de pe termograme care nu sînt determinate de particularitățile geologice ale profilelor, amintim: prezența coloanei de tubaj, pătrunderea noroiului de foraj în roci, circulația apelor în spatele coloanei, influența tălpii sondei și a spălării de către noroiul de foraj a găurii de sondă, convecția și inerția termică a termometrului cu care se execută măsurătoarea și o serie de factori de ordin tehnic.

1.3. Aparatura folosită pentru măsurarea temperaturilor în sonde

În înregistrările de temperatură se folosesc două categorii de aparate: electrotermometre și termometre maximale.

Electrotermometrele sînt traductori ohmici care transformă variații de temperatură în variații de rezistență. Din categoria acestor aparate se deosebesc: a) electrotermometre care înregistrează gradientul geotermic și b) electrotermometre care evidențiază anomaliile termice fără influența gradientului geotermic (electrotermometre diferențiale).

1.3.1. *Electrotermometre care înregistrează gradientul geotermic*

Electrotermometrele care înregistrează gradientul geotermic, la rîndul lor, sînt de două feluri, în funcție de elementul sensibil al traductorului:

— electrotermometre cu rezistențe;
— electrotermometre cu termistori.

Elementul sensibil al traductorului (fie că electrotermometrul este cu rezistențe sau termistori) este plasat într-o schemă punte. Puntea se calibrează de așa manieră ca pentru o temperatură dată, obișnuit 18°C, să fie în echilibru. Variind temperatura se produc variații ale rezistenței elementului sensibil, conducînd la modificarea rezistenței elementului sensibil, deci la dezechilibrarea punții, care este proporțională cu mărirea sau micșorarea temperaturii față de temperatura de echilibru (18°C).

Electrotermometrele cu rezistențe au brațul sensibil al punții constituit din filament de cupru sau platină. Atît cuprul cît și platina au un coeficient termic de variație a rezistenței cu temperatura suficient de mare pentru ca precizia măsurătorilor să fie în limitele erorilor admise.

Variația rezistenței elementului sensibil cu temperatura este dată de relația:

$$R_t = R_0[1+\alpha(t-t_0)] \qquad \text{(XV.8)}$$

în care:

R_t este temperatura mediului la $t°$;
R_0 — temperatura pentru care puntea este în echilibru, respectiv pentru $t_0=18°C$;
α — coeficientul termic al elementului sensibil.

Electrotermometrele cu rezistență sînt, la rîndul lor, de două tipuri: a) electrotermometre care au puntea plasată în întregime în aparatul care se lansează în gaura de sondă (cazul electrotermometrelor pentru

lucrări cu cablu trifilar); b) electrotermometre care au numai elementul sensibil al punții montat în aparatul care se lansează în gaura de sondă (cazul electrotermometrelor pentru lucrări cu cablu monofilar armat metalic la exterior).

— Electrotermometrele cu întreaga punte Wheatstone montată în aparatul care se lansează în gaura de sondă pot avea una sau două rezistențe variabile (sensibile) și trei sau două rezistențe invariabile (pasive) ale punții Wheatstone.

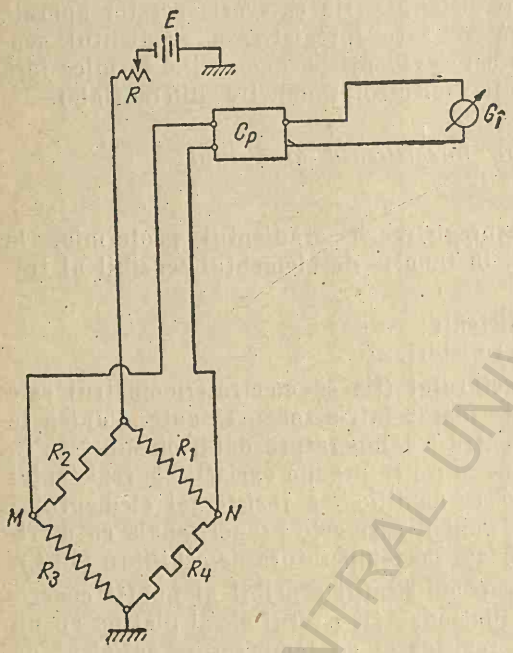


Fig. XV.9. Schema electrotermometrului avînd puntea Wheastone montată în întregime în aparatul care se lansează în gaura de sondă:
C_p — compensator de polaritate; R_1, R_2, R_3, R_4 — rezistențe; Gi — galvanometru înregistrator; E — sursă de curent; MN — puncte între care se măsoară Δt; R — reostat.

Ne vom referi la un electrotermometru cu două rezistențe sensibile, care pot fi din filament de Cu sau Pt.

Rezistențele sensibile, conform fig. XV.9, sînt notate cu R_1 și R_3, iar cele invariabile cu R_2 și R_4 (sînt confecționate din constantan).

Puntea electrotermometrului se alimentează cu curent continuu de intensitate I (acesta poate fi reglat prin intermediul unui reostat R).

Puntea este astfel construită încît la o temperatură $t=t_0$ (temperatura de echilibru) să satisfacă condițiile:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

respectiv

$$R_1=R_3;\ R_2\ R_4=R_0 \quad \text{(XV.9)}$$

În aceste condiții, diferența de potențial măsurată între punctele M și N ale punții va fi egală cu zero: $V_M - V_N = 0$.

La o temperatură $t \neq t_0$, valoarea rezistențelor elementelor sensibile se modifică și puntea se dezechilibrează, astfel că între punctele M și N va apare o diferență de potențial ΔV.

Rezistența brațelor sensibile la temperatura t va fi:

$$R_1=R_3=R_0[1+\alpha(t-t_0)], \quad \text{(XV.10)}$$

iar rezistența brațelor invariabile va rămîne neschimbată:

$$R_2=R_4=R_0 \tag{XV.11}$$

Potențialele în punctele M și N vor fi:

$$V_M=V_A-R_2\frac{I}{2}=V_A-R_0\frac{I}{2} \tag{XV.12}$$

$$V_N=V_A-R_1\frac{I}{2}=V_A-\frac{I}{2}R_0[1+\alpha(t-t_0)] \tag{XV.13}$$

Diferența de potențial între punctele M și N la temperatura $t°$ va fi:

$$\Delta V=V_M-V_N=\frac{I}{2}R_0\alpha(t-t_0) \tag{XV.14}$$

Dacă se notează $\frac{R_0\alpha}{2}$ din relația XV.14 cu $\frac{1}{K}$ (K reprezintă constanta electrotermometrului) se obține:

$$\Delta V=\frac{1}{K}(t-t_0)\cdot I \tag{XV.15}$$

Din relația XV.15 se obține valoarea lui t:

$$t=t_0+K\frac{\Delta V}{I} \tag{XV.16}$$

Dacă notăm cu S_0 sensibilitatea aparatului înregistrator, respectiv numărul de mV corespunzător pentru o variație a temperaturii de 1°C pentru un curent I_0 avem:

$$\frac{\Delta V}{t-t_0}=\frac{I_0}{K} \tag{XV.17}$$

$$S_0=\frac{\Delta V}{t-t_0} \tag{XV.18}$$

Valoarea curentului I_0, în cazul cînd se consideră S_0=2,5 mV/1°C va fi

$$I_0=KS_0=2{,}5K\left[\frac{\text{mV}}{1°\text{C}}\right] \tag{XV.19}$$

Din relația XV.19 se poate deduce valoarea constantei electromotorului:

$$K=\frac{I_0}{2{,}5}\left[\frac{\text{mA}}{\text{mV/°C}}\right] \tag{XV.20}$$

Înlocuind valoarea lui K în relaţia XV.16 se obţine:

$$t=t_0+\frac{I_0}{2,5}\cdot\frac{\Delta V}{I}=t_0+0,4\,\frac{I_0}{I}\Delta V \qquad \text{(XV.21)}$$

Cînd $I=I_0$, relaţia XV.21 devine:

$$t=t_0\pm 0,4\Delta V \qquad \text{(XV.22)}$$

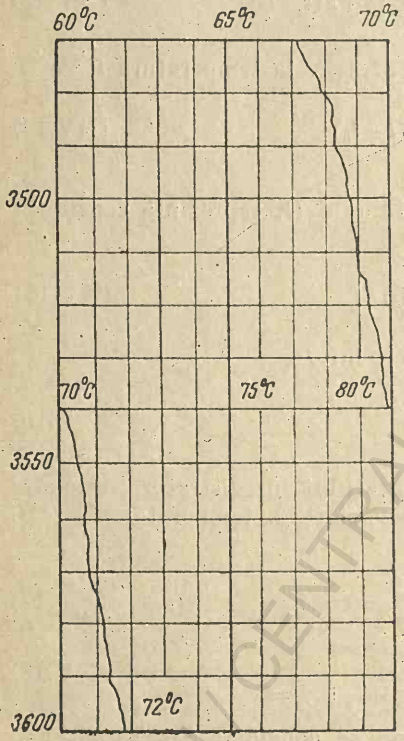


Fig. XV.10. Electrotermogramă.

Pe carcasa electrotermometrelor sînt marcate valorile t_0, I_0, K şi, uneori, sensibilitatea S în milivolţi.

Pentru determinarea constantei K a electrotermometrului se fac etalonări în laborator, folosind ca etalon un termometru cu mercur (la rîndul său etalonat).

Înregistrările termogramelor constau în a alimenta dispozitivul de fund cu un curent continuu constant I şi a înregistra diferenţa de potenţial ΔV cu ajutorul unui potenţiometru înregistrator G_t (v. fig. XV.9).

Obişnuit, înregistrările termogramelor se fac în timpul lansării aparatului în gaura de sondă, pentru a evita denaturarea curbei (noroiul se agită în timpul deplasării electrotermometrului).

Curba care reprezintă variaţia temperaturii în lungul găurii de sondă are o alură înclinată, ca urmare a faptului că temperatura creşte cu adîncimea; se evidenţiază astfel gradientul geotermic al cîmpului termic regional al Pămîntului. [Pentru ca să se înregistreze curba în spaţiul util al benzii de film sau de hîrtie, în schema de înregistrare este prevăzut un compensator de polarizaţie gradat CP, cu ajutorul căruia se decalează curba de la dreapta spre stînga (v. fig. XV.10).

— La electrotermometrele care se lansează în gaura de sondă cu cablu monoconductor armat metalic la exterior; numai traductorul se află montat în aparatul de sondă, iar celelalte elemente ale punţii se

află la suprafață. Aceste termometre au inconvenientul că variația rezistenței cablului cu temperatura conduce la înregistrarea de termograme eronate și în consecință nu se mai utilizează.

Electrotermometrele cu termistori deși prezintă o serie de avantaje față de electrotermometrele cu traductori din conductoare metalice, totuși nu se folosesc, datorită faptului că sensibilitatea termistorilor scade considerabil peste temperatura de 100°C.

1.3.2. *Electrotermometre diferențiale*

În anumite situații este necesar să se evidențieze unele detalii ale cîmpului termic. Pentru aceasta este necesar să se renunțe la măsurarea temperaturii absolute și să se măsoare gradientul temperaturii sau variația temperaturii în raport cu cîmpul termic regional. Se măsoară diferența de temperatură dintre două puncte apropiate gradient-termometric, sau a abaterii temperaturii reale de la o anumită valoare medie.

Măsurarea temperaturilor diferențiale se realizează principial prin două sisteme de punți:

1) **Punte simetrică.** În această schemă, toate cele patru ramuri ale punții sînt active. Ramurile punții sînt conectate astfel încît rezistențele circuitelor *AMB* și *ANB* sînt egale în orice situații. Ca urmare a acestui fapt, curenții care circulă prin ramurile respective sînt egali (v. fig. XV.11, *a*).

2) **Punte nesimetrică.** În această schemă sînt active numai ramurile R_3 și R_4, care sînt conectate la unul din nodurile de alimentare. Ramurile R_1 și R_2 nu-și modifică rezistența o dată cu variația temperaturii. În această situație, se produce redistribuirea curenților în circuitele *AMB* și *ANB*, o dată cu variația temperaturii (v. fig. XV.11, *b*).

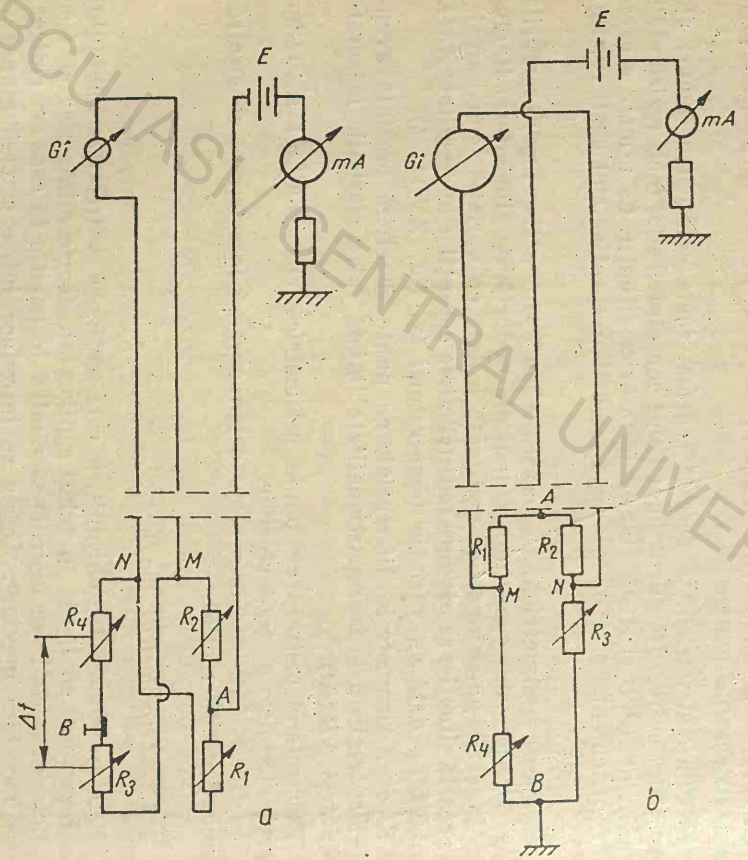
Electrotermometrele diferențiale cu punte simetrică prezintă avantajul că realizează o proporționalitate liniară între mărimile măsurate ΔV, I și $\Delta R\,(\Delta t)$.

Electrotermometrele cu punte nesimetrică au avantajul că reduc inerția termică a traductorilor.

În fig. XV.12 este prezentată o termogramă înregistrată cu electrotermometru diferențial.

1.3.3. *Termometrul maximal*

Este un termometru obișnuit, la care secțiunea de trecere a lichidului din rezervorul cu lichid în tubul capilar este foarte mică, ceea ce face ca lichidul (alcool sau mercur) să rămînă în poziția în care s-a ridicat, la temperatura maximă. Acesta se introduce într-o carcasă etanșă și



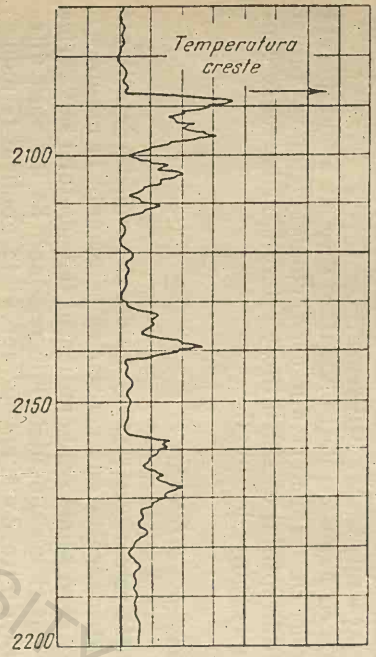


Fig. XV.11. Electrotermometre diferențiale;
a — cu punte simetrică; *b* — cu punte nesimetrică.

Fig. XV.12. Termogramă înregistrată cu termometru diferențial.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

este protejat contra șocurilor. Dezavantajele determinării variațiilor de temperatură cu acest gen de termometre sînt următoarele:

— nu se pot evidenția toate anomaliile de temperatură ale cîmpului termic local;

— se fac multe lansări ale aparatului în gaura de sondă, deci reținerea sondei un timp îndelungat.

1.4. Interpretarea termogramelor

La interpretarea termogramelor trebuie avut în vedere faptul că în gaura de sondă există noroiul de foraj și se creează un cîmp termic artificial, deoarece noroiul are o temperatură deosebită de a rocilor cu care vine în contact.

Pentru a se exclude greșelile de interpretare a profilelor, trebuie cunoscută poziția punctului A din profil, în care temperatura noroiului este egală cu a rocilor. Determinarea pe termogramă a punctului A se poate face prin două procedee, care de fapt au la bază același principiu: compararea a două sau mai multe termograme înregistrate după intervale de timp diferite.

1. Primul procedeu constă în a compara termograma cîmpului termic artificial *1*, care se înregistrează la un interval de timp relativ scurt după oprirea circulației noroiului de foraj, cu termograma cîmpului termic natural (geotermograma) *2*, care se înregistrează după un timp suficient de mare pentru ca noroiul de foraj să aibă aceeași temperatură cu a mediului ambiant (v. fig. XV.13, *a*).

2. Al doilea procedeu pentru determinarea punctului A este similar cu primul, cu deosebirea că nici una din termogramele care se compară nu a fost înregistrată în regim staționar (temperatura noroiului t_n nu este egală cu temperatura formațiunii t_f (v. fig. XV.13, *b*). La determinarea punctului A prin acest procedeu, se deosebesc două cazuri:

— Primul caz. Temperatura noroiului este mai mare decît a mediului înconjurător. În această situație, rocile au rezistivitate termică mică (cu conductivitate termică ridicată); de exemplu, nisipurile acvifere prezintă anomalii de temperatură scăzută adică negative, iar rocile cu rezistivitate termică ridicată, ca de exemplu argilele, nisipurile uscate etc., prezintă anomalii de temperatură mai ridicată, adică pozitive (v. fig. XV.13, *b*).

— Al doilea caz. Temperatura noroiului de foraj este mai mică decît a mediului înconjurător. În acest caz se observă fenomenul invers (v. fig. XV.13, *b*).

Influența diferenței dintre temperatura noroiului de foraj și a rocilor înconjurătoare se manifestă astfel: pe măsura depărtării de punctul A de egală temperatură, se observă o creștere a anomaliilor de tempera-

tură, iar pe măsura apropierii de punctul A se observă o micşorare a acestor anomalii. Pentru evaluarea caracteristicilor termice ale straţelor situate la diferite distanţe de punctul A, se înmulţeşte amplitudinea anomaliei de temperatură Δt cu valoarea raportului H_A/H în care H_A

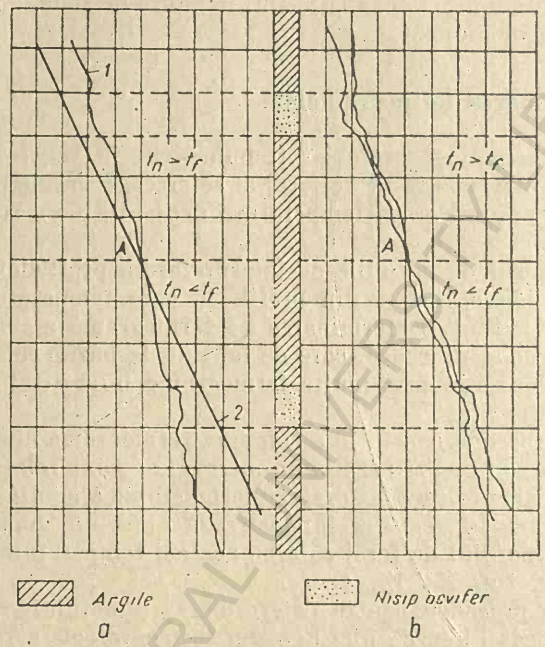


Fig. XV.13. Determinarea punctului A, care indică echivalenţa dintre temperatura rocilor şi temperatura noroiului din foraj;

a — cazul înregistrării termogramei în regim termic staţionar; *b* — cazul înregistrării în regim termic nestaţionar.

este distanţa de la punctul A la o anomalie cu proprietăţi termice cu noscute şi H este distanţa de la punctul A la stratul considerat [1]

Influenţa diametrului găurii de sondă. Prezenţa cavernelor conduce la acumularea unei cantităţi mai mari de noroi în dreptul acestora decît în dreptul zonelor cu diametru normal. Pe porţiunile din dreptul cavernelor, procesul de răcire (încălzire) decurge mai încet şi temperatura măsurată a noroiului de foraj se deosebeşte mai mult de temperatura intervalelor pe care gaura de sondă are diametru normal.

În majoritatea cazurilor, influenţa diametrului găurii de sondă nu complică interpretarea termogramelor. Sînt cazuri cînd termogramele

contribuie la stabilirea succesiunii stratigrafice și a naturii litologice a stratelor traversate de foraje, după cum este prezentat în fig. XV.14.

În cazul huilelor, se obțin anomalii de temperatură mari, deoarece huilele au o rezistivitate termică mare (6,7—12 mh°C/kcal) (v. fig. XV.15).

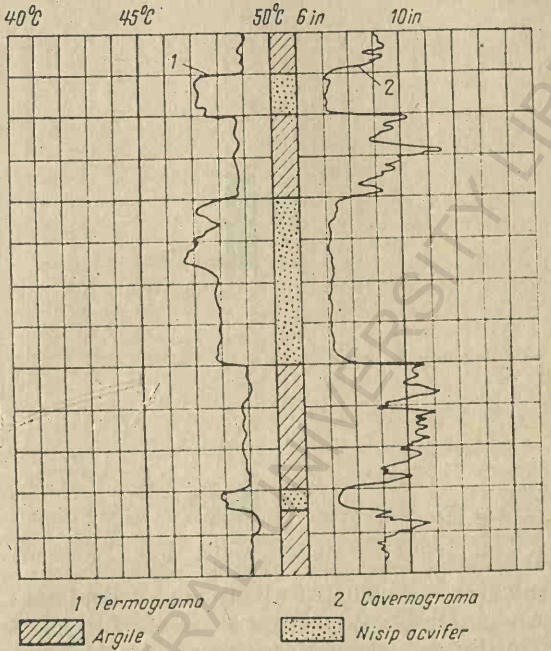


Fig. XV.14. Stabilirea pe termograme a succesiunii stratigrafice și a naturii litologice a stratelor traversate de foraje.

În cazul depunerilor de sare gemă, în dreptul cărora se formează caverne, datorită faptului că au o rezistivitate termică scăzută (0,16 mh°C/kcal), se obțin anomalii de temperatură scăzute.

La interpretarea termogramelor trebuie avut în vedere că deasupra tălpii găurii de sondă se obține o anomalie de temperatură maximă, care se explică prin suprafața mică de răcire a rocilor în talpă și prin faptul că în momentul tăierii rocilor se degajă o temperatură suplimentară. Această anomalie de temperatură din talpă se menține mai multe zile, după care termograma se apropie de aspectul normal al geotermogramei.

La determinarea adîncimii reale a anomaliilor de temperatură ce apar pe termograme trebuie avut în vedere influența convecției și a inerției termice a termometrului.

Convecția influențează într-o mică măsură adîncimea reală a anomaliilor de temperatură. Ele deplasează întrucîtva anomaliile termice în sus (la înregistrarea de sus în jos) și aceasta cu atît mai mult cu cît vîscozitatea noroiului este mai mică și gradientul geotermic este mai mare.

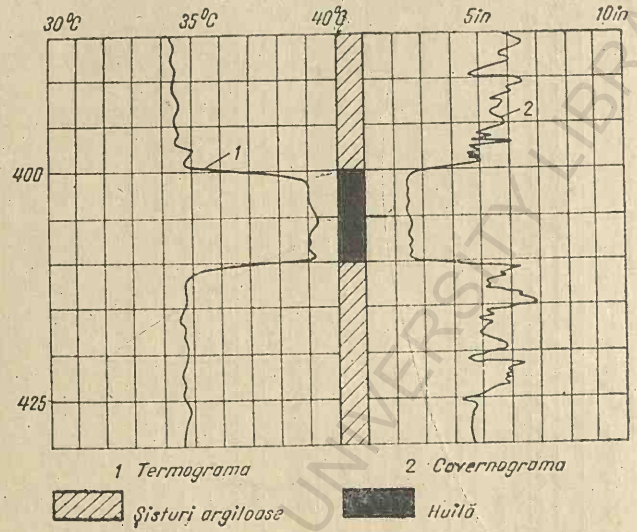


Fig. XV.15. Evidențierea unui strat de huilă pe termogramă.

Inerția termică* a termometrului produce o deplasare în jos a anomaliilor pe termograme (la înregistrarea de sus în jos). Inerția termică depinde de sensibilitatea elementelor sensibile ale punții și de faptul dacă acestea vin în contact direct cu noroiul de foraj sau nu.

În funcție de tipul electrotermometrului folosit (respectiv de inerția sa termică), se va stabili viteza de lansare a termometrului, pentru a se reduce la maxim deplasarea în jos a anomaliilor de temperatură. La termometrele cu filament de platină, a căror inerție termică este de 0,1 s, se poate înregistra cu o viteză de lansare de 1 000 m/h și chiar mai mult.

1.5. Domeniul de aplicabilitate

Întrucît o parte din aplicațiile metodei au fost descrise, se va face o simplă enumerare a acestora:

— stabilirea succesiunii statigrafice și eventual a naturii litologiei stratelor traversate de foraje (v. fig. XV.14 și XV.15);

* Inerția termică a termometrului reprezintă timpul exprimat în secunde necesare ca traductorul de temperatură să ajungă la temperatura mediului ambiant.

— evidențierea stratelor gazeifere (v. fig. XV.6);

— evidențierea unor strate ce conțin substanțe minerale utile (cărbuni, sulfuri, v. fig. XV.7 și sare gemă);

— studiul variației gradientului geotermic, respectiv a treptei geotermice (v. fig. XV.3);

— determinarea structurilor anticlinale și sinclinale (v. fig. XV.2 și XV.4);

— determinarea intervalului din spatele coloanei în care circulă fluide. Porțiunile în care circulă ape în spațiul inelar din spatele coloanei se disting pe termograme prin anomalii de temperatură ridicate, dacă temperatura apelor de circulație este mai mare decît temperatura fluidului ce umple gaura de sondă și prin anomalii scăzute în caz contrar.

Cunoașterea temperaturii în lungul găurii de sondă permite rezolvarea și a o serie de probleme privind interpretarea diagrafiilor. tehnologia forajului și extracției:

— aplicarea corecțiilor privind influența temperaturii asupra rezistivității rocilor și a noroiului de foraj;

— în cazul deschiderii stratelor prin perforare să se folosească explozivii rezistenți la temperatura din dreptul intervalului ce trebuie încercat;

— detectarea locului unde se pierde fluidul de foraj; acest lucru este posibil datorită faptului că noroiul care pătrunde în formațiune este mai rece decît noroiul care staționează în porțiunea de gaură inferioară a locului unde se produce pierderea. Pe diagrafia termică, locul unde se pierde noroiul de foraj este marcat ca în fig. XV.16;

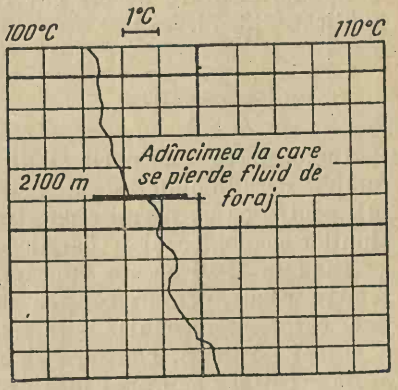


Fig. XV.16. Diagrafie termică ilustrînd adîncimea la care se pierde fluid de foraj.

— stabilirea caracteristicilor cimentului și a compoziției laptelui de ciment în scopul asigurării condițiilor normale de cimentare a coloanelor sondelor de mare adîncime.

În anumite cazuri, se poate determina debitul gazelor, atunci cînd o cantitate de gaze pătrunde în gaura de sondă. În această situație, după cum s-a arătat, datorită efectului de răcire, pe termogramă apar anomalii pregnante (v. fig. XV.6). Între mărimea anomaliei și debitul gazelor care au produs-o se pot stabili relații de reciprocitate [7].

2. CAVERNOMETRIA

În prezent operaţiunile de cavernometrie se execută sporadic, deoarece s-au introdus dispozitive cu care se execută microcavernograme simultan cu alte diagrafii (microlaterolog, microcarotaj, pandajmetrie, gama-gama etc.).

Cavernometria se execută, totuşi, în continuare în găuri de sondă al căror diametru este mai mare decît 360 mm (cît permite deschiderea braţelor dispozitivelor enumerate mai sus). Cavernometrele clasice permit măsurarea unui diametru al găurii sondei pînă la 810 mm.

Principial, variaţia diametrului găurii sondei se stabileşte prin măsurarea unei diferenţe de potenţial obţinută pe o rezistenţă reglabilă pe care alunecă un cursor. Mişcarea cursorului este comandată de braţele cavernometrului (3—4 braţe) care freacă pe peretele găurii sondei.

După tipul cavernometrului, diagrafia poate fi înregistrată în scară liniară sau în scară cvadratică. În ultimul caz, valoarea înregistrată este proporţională cu suprafaţa găurii sondei. Înregistrarea în scară cvadratică are avantajul că permite calcularea cu uşurinţă a volumului găurii sondei în vederea stabilirii cantităţii laptelui de ciment pentru cimentarea coloanelor.

În fig. XVI.14 şi XVI.15 s-au prezentat exemple de cavernograme. Date suplimentare despre cavernometrie sînt prezentate în alte lucrări publicate [3, 7].

3. PANDAJMETRIA

Cunoaşterea înclinării şi direcţiei înclinării stratelor străbătute de forajele de adîncime este de o importanţă deosebită în geologia petrolului, pentru că ea permite construirea cît mai aproape de realitate a secţiunilor geologice şi a hărţilor structurale.

Pînă în 1940 aceste informaţii se obţineau, cu un grad de precizie relativ scăzut, prin extragerea de carote mecanice orientate cu ajutorul unei carotiere mecanice speciale care, pe lîngă dispozitivul de reţinere a probei de teren, conţinea şi un dispozitiv de înregistrare a deviaţiei şi de orientare a probei faţă de nord.

Se utiliza, de asemenea, metoda de corelaţie a unuia şi aceluiaşi strat pe profilele electrice sau mecanice a trei sonde aşezate în linie dreaptă; cu ajutorul valorilor izobatice pentru un anumit reper de corelaţie se stabilea, prin metoda triadei, direcţia şi înclinarea stratului reper.

Pandajmetrul este un aparat de cercetare a găurilor de sondă care, introdus cu cablu la puţ, înregistrează simultan trei curbe de carotaj electric, cu ajutorul a trei electrozi sau serii de electrozi situaţi pe un

plan perpendicular pe axa aparatului. În felul acesta se definește poziția în spațiu a trei puncte din planul unui strat pe peretele cilindric al găurii de sondă (fig. XV.17). Aparatul are și un sistem de orientare, care stabilește poziția față de nord a electrodei și în același timp deviația

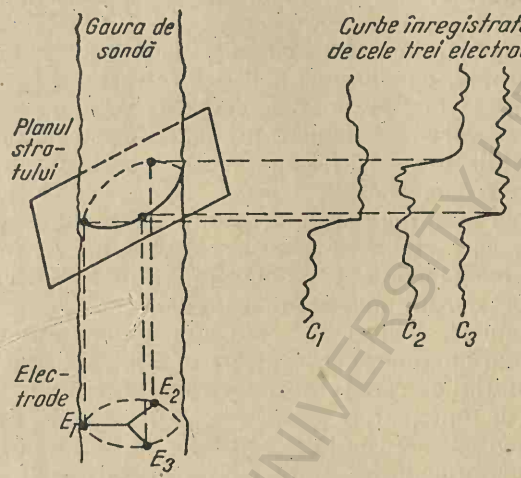


Fig. XV.17. Schema principială pentru determinarea a trei puncte din planul unui strat situat pe peretele cilindric al găurii de sondă.

orientativă a găurii de sondă. În baza înregistrărilor făcute, cu ajutorul acestor elemente se pot calcula înclinarea și direcția înclinării stratelor în fiecare din punctele unde s-a făcut înregistrarea.

Primele pandajmetre, construite între anii 1942—1945, înregistrau curbe de potențial natural, care nu pot fi folosite cu succes în toate formațiunile. Începînd din 1945 s-a trecut la înregistrarea curbelor de rezistivitate, metodă care se menține și astăzi.

Datorită imposibilității înregistrării continui — în mișcare — a elementelor de orientare, pînă în anul 1952 s-a practicat pandajmetria discontinuă, prin puncte. La aceste aparate, înregistrarea celor trei curbe de PN (și mai tîrziu de rezistivitate) se făcea pe intervale de maximum 12—15 m, iar elementele de orientare se măsurau la cele două extremități ale intervalului cu pandajmetrul nemișcat. În cazul cînd pozițiile aparatului coincideau la ambele măsurători, se admitea că aparatul nu s-a rotit în timpul înregistrării intervalului considerat și deci curbele înregistrate pot fi interpretate pentru stabilirea orientării stratelor în unul sau două puncte de la jumătatea intervalului.

Începînd din 1952 s-a introdus pandajmetrul cu înregistrare continuă, care a fost perfecționat neîncetat prin utilizarea tuturor posibilităților oferite de evoluția tehnicii moderne.

Pandajmetrul cu înregistrare continuă este un aparat complex cu care se efectuează simultan, într-un singur marș, pe toată lungimea dorită din gaura de sondă, următoarele operații:

— înregistrarea a trei curbe de corelație de conductivitate focalizate, de tip microlaterolog, cu ajutorul a trei electrozi E_1, E_2 și E_3, așezați pe trei brațe dispuse la 120° unul de celălalt;

— înregistrarea variației diametrului găurii de sondă prin măsurarea deschiderii variabile a celor trei brațe care poartă electrodele (operațiune de microcavernometrie);

— înregistrarea a trei curbe de orientare în spațiu a aparatului și a găurii de sondă, care stabilesc poziția electrodului E_1 față de nordul magnetic, înclinarea găurii de sondă măsurată față de verticală și direcția înclinării față de nordul magnetic (azimut).

Cei șapte parametri enumerați se obțin cu un aparat de fund care are de obicei 4,80—6 m lungime și se transmit la suprafață prin cei 7 conductori izolați ai cablului cu care se introduce aparatul la puț. La suprafață, în dispozitivele de înregistrare existente se obține, pe film sau hîrtie fotografică, o diagramă de tipul celei arătate în fig. XVI.18, unde apar riguros corelate cu adîncimea — înregistrată la scara 1/20 — șapte curbe continui de variație a parametrilor menționați.

Descrierea aparatului. În șantierele noastre petrolifere este folosit un pandajmetru continuu de tipul cel mai modern, de construcție P.G.A.C. (Pan Geo Atlas Corporation), reprezentat schematic în fig. XV.19.

La partea inferioară, un corp detașabil, de circa 1,40 m lungime, suportă 3 brațe articulate așezate la 120° fiecare. Pe brațe sînt montate patine de cauciuc care poartă electrozii E_1, E_2 și E_3 de măsură a conductivității microfocalizate. În timpul înregistrării, patinele sînt menținute într-un contact cît mai strîns cu peretele găurii, prin arcurile de tensiune existente în fiecare braț. La introducere, brațele sînt strînse, iar în timpul marșului de înregistrare ele se deschid prin intermediul unui sistem de declanșare cu inflamatori, comandat de la suprafață, la momentul necesar.

Cavernometria se realizează prin dispozitivul F, în care variația deschiderii celor trei brațe articulate — corespunzătoare variației diametrului găurii de sondă — este însumată într-o mișcare longitudinală a cursorului unui potențiometru și transmisă la suprafață cu un semnal de rezistență.

Corpul de deasupra, lung de circa 2,10 m, cuprinde grupul de aparate pentru măsurarea orientării și înclinării găurii și a dispozitivului de cercetare. Busola D măsoară azimutul (unghiul față de nord) unei gene-

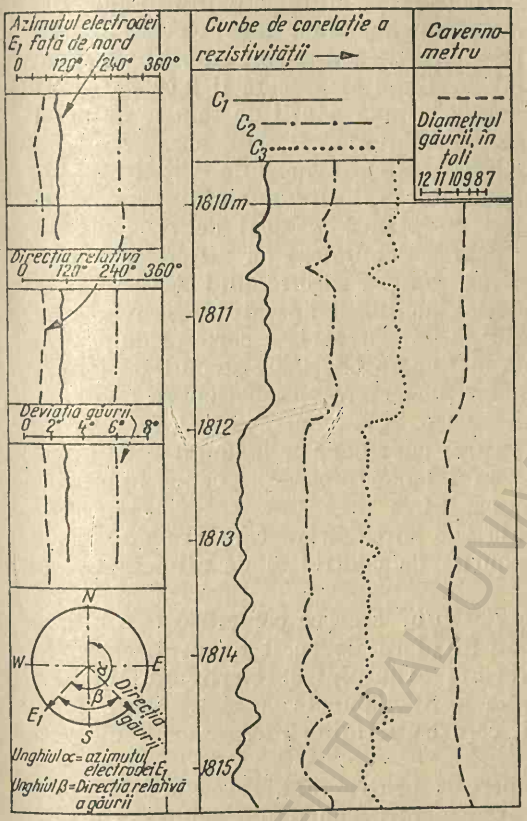


Fig. XV.18. Diagramă înregistrată cu pandajmetru cu înregistrare continuă.

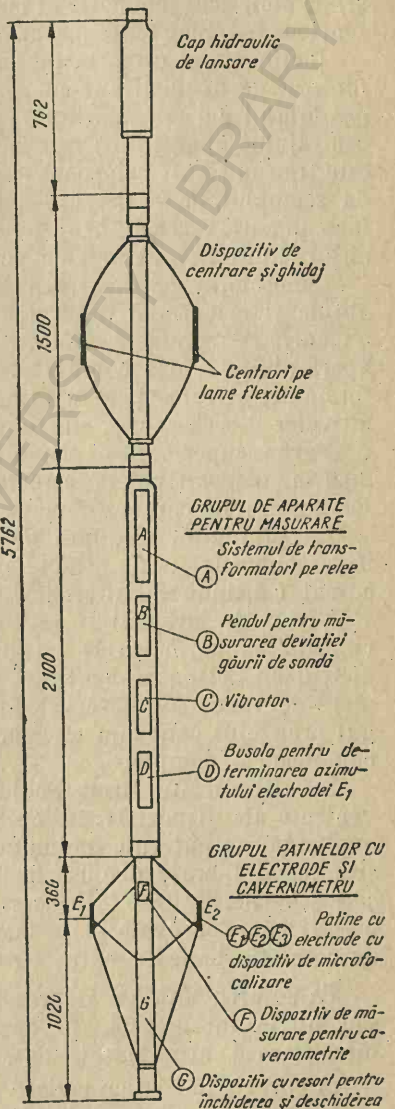


Fig. XV.19. Schema pandajmetrului tip P.G.A.C.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

ratoare de referință, care corespunde ca poziție cu electrodul de referință E_1 și, de aici, acul magnetic al busolei acționează asupra circuitului unui potențiometru, rezistența măsurată corespunzînd azimutului electrodului E_1.

Înclinarea și direcția înclinării găurii de sondă sînt stabilite în mod indirect de dispozitivul cu pendul *D*. Unghiul pe care îl face verticala pendulului cu axa aparatului (identic cu axa găurii de sondă, datorită centrajului aparatului) reprezintă înclinarea; valoarea acestui unghi este transmisă tot printr-un semnal de rezistență variabilă. Un alt reostat dă semnalul de rezistență corespunzător valorii unghiului pe care îl face planul vertical al pendulului cu planul vertical de referință al electrodului E_1, parametru care poartă denumirea de *direcție relativă*.

Cunoscîndu-se orientarea față de nord a electrodului E_1 se poate obține și orientarea reală a direcției înclinării aparatului și respectiv a găurii de sondă. Deasupra pendulului, în același corp principal al aparatului, se află compartimentul *A*, care conține sistemul de transformatori și relee pentru alimentare, conectare și funcționare a dispozitivelor descrise, care sînt notate pe fig. XV.19 cu *B*, *C*, *D*, *E*, *F* și *G*.

Partea superioară a pandajmetrului cuprinde, pe o lungime de circa 2,25 m, dispozitivul de cercetare cu 4 lame flexibile și capul hidraulic de lansare în care este prins și cablul.

La suprafață, în afara panoului de înregistrare care are de obicei 9 galvanometri, sînt situate panourile de control și de alimentare cu curent continuu și alternativ.

Viteza de înregistrare este de 720 m/h, ceea ce conferă o eficacitate ridicată pandajmetrului continuu. În afară de acest avantaj, pandajmetrul cu acționare continuă prezintă avantajul obținerii unui număr mare de puncte de observație (pînă la 3—4 puncte pe metru) de-a lungul profilului continuu al găurii, ceea ce permite interpretări geologice complexe și complete.

În ultimii ani, firma Schlumberger, pentru înlăturarea unor inconveniente ale dispozitivului cu 3 brațe pentru găurile de sondă de formă ovalizată sau puternic înclinată, a construit un pandajmetru cu 4 patine, situate pe 4 brațe dispuse la 90°, cu autonomie de mișcare pentru fiecare pereche de brațe. În acest fel, cele 4 patine se aplică mai bine pe pereții găurilor ovale și se mărește probabilitatea de a obține 4 curbe de corelație bune (a patra servind de verificare pentru celelalte).

Calcularea datelor și prezentarea rezultatelor. S-a arătat că pe film sau hîrtie fotografică, la operațiunea de pandajmetrie continuă, se înregistrează următoarele date (v. fig. XV.5):

a) curbele de microrezistivitate focalizate C_1, C_2 și C_3;

b) azimutul electrodului E_1, care reprezintă unghiul pe care îl face planul vertical al patinei respective cu nordul magnetic măsurat în sensul acelor de ceasornic;

c) înclinarea găurii de sondă față de verticală;

d) direcția relativă a înclinării găurii de sondă, măsurată față de planul vertical și respectiv azimutul patinei și electrodului E_1;

e) diametrul găurii de sondă;

f) adîncimea găurii de sondă.

Prelucrarea datelor înregistrate se face pe puncte sau intervale de adîncime la nivelul unde este corelată diagrama, prin calcule matematice cu ajutorul reprezentărilor vectoriale. Operațiunea poartă numele de *computare* și se efectuează în mai multe etape:

1. Obținerea planului stratului prin corelarea celor 3 curbe de rezistivitate (măsurarea deplasării pe verticală a reperului de corelație calcularea înclinării planului care trece prin cele trei puncte și a direcției lui de cădere față de nordul magnetic cu ajutorul azimutului electrodului E_1); se obțin direcția înclinării și înclinarea planului stratului în valori aparente necorectate față de nordul magnetic.

2. Obținerea planului găurii de sondă, respectiv a înclinării și direcției înclinării față de nordul magnetic.

3. Determinarea direcției și înclinării reale a stratului, prin însumarea vectorilor celor două plane componente, întîi față de nordul magnetic și apoi prin corecția de declinație magnetică față de nordul geografic.

Calculele se pot efectua manual, cu ajutorul unor abace sau diagrame, prin soluții grafice de geometrie descriptivă sau prin analizori (computori) electronici, care efectuează într-un timp foarte scurt calculele pentru toate punctele de corelație posibile — uzual cîteva sute într-o sondă adîncă.

Rezultatele computării sînt prezentate sub forma unui tabel de calcul, în care se arată elementele obținute din înregistrare și rezultatele calculelor. Indicîndu-se și calificativul elementului de orientare obținut — foarte bun, bun, acceptabil, dubios.

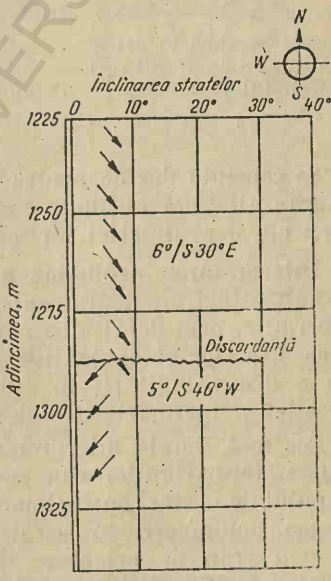


Fig. XV.20 Discordanță structurală marcată de schimbarea direcției stratelor. Înregistrare prin pandajmetrie continuă.

Alături de tabelul de calcul, rezultatele se prezintă grafic sub forma unei diagrame cu scara verticală 1/500 sau 1/200, pentru a putea fi core-

lată cu diagrafiile electrice obișnuite și cu reprezentarea sub forma unor săgeți a elementelor de orientare. Originea vectorului indică, prin depărtarea lui față de orizontală, unghiul de înclinare a stratului, iar orientarea vectorului, măsurată în sensul acelor de ceasornic, față de nord (orientare desenată în partea de sus a diagramei) arată azimutul stratului (v. fig. XV.20).

Erori posibile. S-a verificat experimental că aparatura folosită în pandajmetriile continui nu introduce nici un fel de erori sistematice în măsurători. În schimb, în prelucrarea datelor obținute, imprecizia în corelarea și citirea valorilor curbelor obținute — în special la stratele cu înclinări foarte mici — face să apară următoarele erori posibile:

Pentru înclinări ale stratelor de:		2°	5°	10°	15°	20—25
Eroarea maximă în determinarea înclinării	în grade	0°30′	0°45′	1°30′	1°45′	2°
	în procente	16%	16%	15%	10%	10%
Eroarea maximă în determinarea azimutului real al stratului	în grade	25°	20°	13°	10°	10°
	în procente	14%	11%	7%	5%	5%

Se constată dar că pentru stratele cu înclinări mai mari de 15°, precizia rezultatelor obținute crește, atît în ce privește determinarea înclinării cît și a direcției înclinării.

Interpretarea geologică a rezultatelor. Pandajmetrul continuu a devenit astăzi un instrument nelipsit în geologia structurală, pentru că el permite, prin densitatea mare a măsurătorilor, să se stabilească orientarea stratelor și anomaliile structurale (falii, neconformități, efilări), sau a discontinuității în sedimentare, care se reflectă în schimbarea direcției și înclinării stratelor străbătute de foraje.

Cea mai simplă interpretare se leagă de stabilirea stratificației normale a formațiunilor din zona cercetată, care corespunde în general grupului de vectori cu înclinarea cea mai mică și cu direcția aproximativ aceeași. Schimbarea bruscă de direcție sau de înclinare, cu o trecere la un nou grup de orientare quasi-constantă, marchează o discordanță structurală (fig. XV.20). Faliile sînt marcate de schimbarea înclinării, de schimbarea direcției înclinării sau de variația ambelor elemente, în zona de faliere apărînd creșteri bruște ale înclinărilor; în cazul unei zone complexe tectonizate dispar elementele măsurabile.

Dezvoltările lenticulare ale nisipurilor pot fi sesizate prin pandajmetriile continui, capetele de lentilizare ale nisipurilor fiind marcate deosebit de stratificația normală, așa cum reiese din fig. XV.21.

În cazul sondelor săpate în vecinătatea domurilor de sare, reprezentarea grafică a direcției și înclinării stratelor va reda aproape identic profilul peretelui sării — așa cum se poate constata în fig. XV.22.

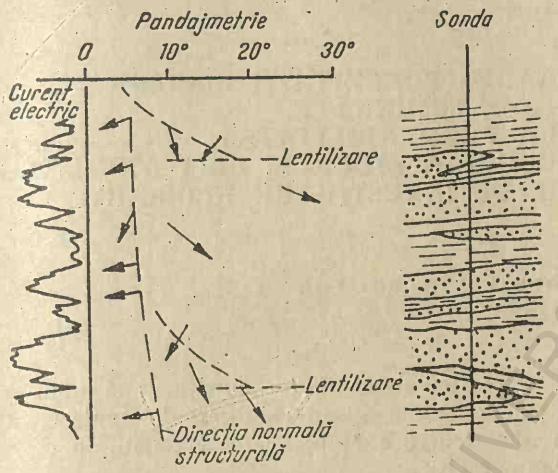


Fig. XV.21. Evidențierea prin pandajmetrie a zonelor de lentilizare a nisipurilor.

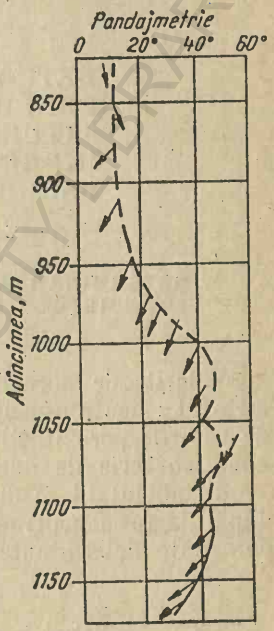


Fig. XV.22. Profilul unui dom de sare evidențiat prin pandajmetrie continuă.

BIBLIOGRAFIE

1. Dahnov, V. N. **Interpretarea rezultatelor cercetării geofizice a profilelor de sondă.** Editura tehnică, 1961, pp. 73—76.
2. Petcu, G. I. **Metodele cele mai eficace de cercetare în lucrările geologice.** C.D.I.M.F., 1965, p. 39—42.
3. **Manualul inginerului.** Vol. I. Editura tehnică, 1965, p. 1130.
4. Dahnov, V. N. și Konov, D. N. **Termiceskie issledovania skvajini,** Gostoptehizdat, 1952.
5. Diakonov, D. I. **Geotermiia v neftianoi geologhii.** Gostoptehizdat, 1958.
6. Guyod, H. **Temperature Well logging Oil Weekly,** vol. 123, nr. 8, 9, 10, 11, 1946.
7. **Realizări noi în diagrafia sondelor de țiței și gaze.** I.D.T. 1965, pp. 132—135.
8. Bricaud, J. M. Poupon, A. **Le pandagemetre continuu a poteclinomètre et a microdispositifs focalisés.** 5-e Congres Mondial du Pétrole, New York, 1959.
9. **Determining true formation thickness from the Dipmeter.** Doc. P.G.A.C., 1964.
10. Fons, L. **New Dipmeter Tool Logs in Nonconductive Mud.** The Oil and Gas Journal, Aug. 1, 1966, p. 124.

BIBLIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITARĂ

CAPITOLUL XVI

DETERMINAREA POROZITĂȚII ROCILOR PRIN METODE COMBINATE. SATURAȚIA, PERMEABILITATEA, HIDROCARBURI REZIDUALE, ROCI ARGILOASE. PROGRAME DE INVESTIGARE GEOFIZICĂ

1. DETERMINAREA POROZITĂȚII ROCILOR PRIN METODE COMBINATE

Valorile de porozitate a rocilor determinate numai după una din metodele: neutron-neutron, gama-gama și sonică, diferă în unele cazuri de valorile porozităților reale. Pentru exemplificare se redau, în continuare, o serie de date comparative.

În tabelul 14 se dau comparativ valorile de porozitate determinate după diagrafia neutron-neutron epitermici din fig. XVI.1 și valorile de porozitate determinate după carote (documentație P.G.A.C.).

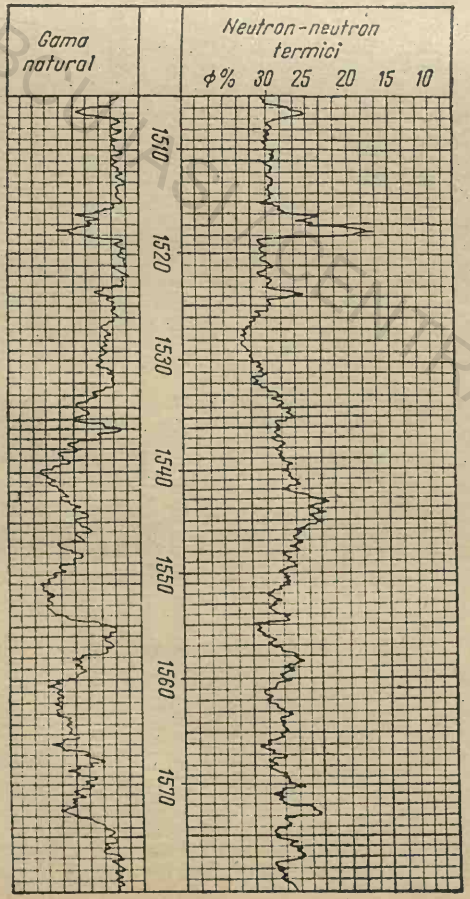
Tabelul 14

Valori de porozitate determinate după carote și după diagrafii neutron-neutron termici

Adîncimea	Porozitatea ∅	
	determinare după carote	determinare după o diagrafie neutron -neutron termici
1540—1541	10 %	29 %
1547—1548	15 %	28 %
1551—1554	30 %	32 %
1561—1562	30 %	35 %
1571—1572	20 %	22 %

În fig. XVI.2 se redau comparativ valorile de porozitate determinate după diagrafia gama-gama și valorile de porozitate determinate după carote.

În tabelul 15 se redau comparativ valorile de porozitate determinate după carote și valorile de porozitate determinate după o diagrafie sonică utilizînd relația XVI.2 [2].



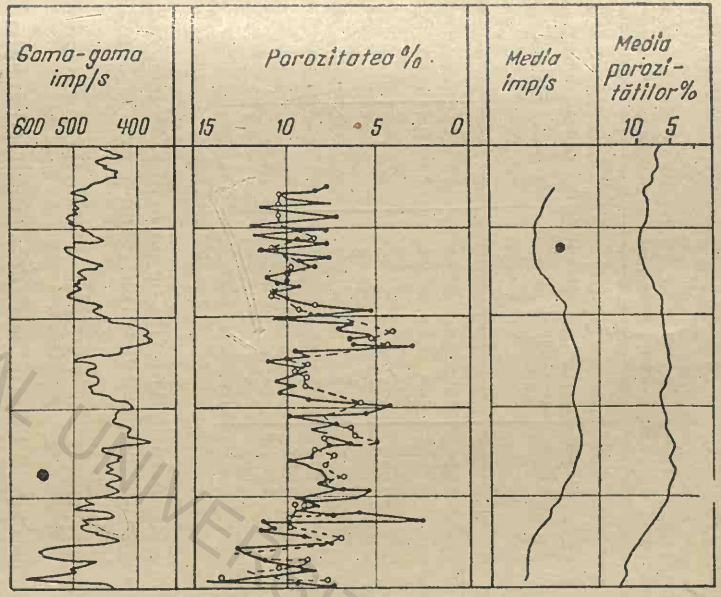


Fig. XVI.1. Diagrafie neutron-neutron epitermici exprimată în termeni de porozitate.

Fig. XVI.2. Compararea valorilor de porozitate determinate după diagrafii gama-gama și după carote [1].

Tabelul 15

Valori de porozitate determinate după carote și după diagrafii sonice

Adîncimea	Porozitatea ∅	
	determinare după carote	determinare după o diagrafie sonică
1686	15,5 %	15 %
1688,5	19 %	17 %
1690	3 %	9 %
1691,5	3 %	9 %
1694	9 %	14,5 %
1695	15 %	18 %
1697	20 %	17 %
1701	16 %	18 %
1702	1,2 %	8,5 %
1705,2	18 %	19 %
1707,5	16 %	17 %

Tabelul 16

Valori de porozitate determinate după carote și diagrafii neutronice, gama-gama și sonice

Adîncimea, m	Porozitatea ∅			
	determinare după carote, %	determinare după diagrafie nn, %	determinare după diagrafie YY, %	determinare după diagrafie sonică, %
1914,2	22	35	15	29
1917	25	34	24	34
1921	27	32	25	29
1929	27	35	30	34
1932	7	18	6	3,5
1936	25	32	25	28
1944	26	33	25	29
1948	23,5	31	21	26
1956,2	14	23	15	15
1960	5	18	13	11,5

În tabelul 16 se redau comparativ valorile de porozitate determinate după carote și după diagrafiile neutron-neutron, gama-gama și sonică, înregistrate în aceeași sondă [2].

Din analiza datelor prezentate în tabelele și figurile menționate rezultă următoarele:

— Între valorile de porozitate determinate după diagrafii (neutron-neutron, gama-gama și sonice) există diferență datorită următoarelor cauze:

— Determinarea porozității după diagrafii se realizează cu relații stabilite de multe ori empiric, după abace (care sînt o expresie grafică a relațiilor matematice), la care intervin parametri sau constante care trebuie determinate în funcție de natura și particularitățile formațiunilor traversate de foraje, precum și în funcție de condițiile din găurile de sonde. De exemplu, în cazul diagrafiilor sonice este necesar să se aprecieze timpul de propagare a undelor elastice de frecvență ultrasonoră prin matricea rocilor, respectiv să se aprecieze valoarea lui Δt_m în μs/m sau μs/picior; în cazul diagrafiilor neutron-neutron este necesar să se estimeze valorile constantelor A și B pentru determinarea porozității din relația: $\varnothing_s = AN + B$ etc.;

— Determinarea valorilor de porozitate după carote se realizează în laborator, unde condițiile diferă de cele din gaura de sondă, în care se înregistrează diversele diagrafii;

— Determinarea valorilor de porozitate în laborator se face pe eșantioane mici, preluate din carotele mecanice (volumul eșantioanelor este

de ordinul cm^3), eşantioane care în unele cazuri nu sînt reprezentative, pe cînd determinarea valorilor de porozitate după diagrafii se realizează pe volume mai mari de roci (volumul rocilor cuprinse în măsurătoare depinde de o serie de factori, din care cel mai important este raza de investigare a dispozitivului de măsură). Acest volum variază de la decimetri cubi (cazul diagrafiilor înregistrate cu dispozitive gama-gama sau microdispozitive) la metri cubi (cazul diagrafiilor sonice neutronice şi de rezistivitate aparentă).

2. Există unele diferenţe între valorile de porozitate determinate după diagrafii înregistrate în aceeaşi gaură de sondă (v. tab. 16). Cauzele acestor diferenţe sînt:

— În cazul diagrafiilor neutron-neutron se măsoară porozitatea totală, deoarece neutronii nu diferenţiază protonii din fluidele libere, din fluidele adsorbite şi din fluidele de constituţie. Ca urmare, valorile de porozitate determinate după diagrafiile neutron-neutron vor fi cele mai mari în comparaţie cu valorile de porozitate determinate după diagrafiile gama-gama sau sonice;

— În cazul diagrafiilor gama-gama, densitatea globală (δ_g) variază cu natura fluidului ce saturează porii rocilor, respectiv cu densitatea acestuia (δ_f). În plus, prin investigarea cu dispozitive gama-gama se cuprind în măsurătoare toate golurile din roci, atît cele comunicante cît şi cele necomunicante;

— În cazul diagrafiilor sonice, porozitatea rocilor depinde de timpul de propagare a undelor elastice de frecvenţă ultrasonoră prin matricea rocilor (Δt_m) şi mai puţin de timpul de propagare a aceloraşi unde elastice prin fluidul care saturează porii rocilor (Δt_f) şi aceasta are valabilitate pentru rocile consolidate sau compacte (gresii consolidate şi calcare). Valorile de porozitate determinate după diagrafii sonice depind de asemenea de dimensiunile porilor rocilor, în sensul că atunci cînd dimensiunile acestora sînt mai mici decît lungimea de undă a semnalelor acustice, valorile de porozitate obţinute redau cu mai multă acurateţe porozitatea reală (cazul rocilor cu porozitate cristalină şi intercristalină).

Pentru eliminarea neconcordanţelor arătate, în vederea obţinerii valorilor de porozitate cît mai aproape de porozitatea reală, în prezent există tendinţa să se determine porozitatea rocilor după metode combinate: sonic + gama-gama; sonic + neutron-neutron; gama-gama + neutron-neutron.

1.1. Determinarea litologiei şi porozităţii rocilor după diagrafii sonice şi neutronice

Prima abacă pentru determinarea porozităţii rocilor prin metode combinate a fost construită de Schlumberger, plecînd de la relaţiile

folosite pentru determinarea porozității după diagrafii neutronice (v. rel. XVI.1) și diagrafii sonice (v. rel. XVI.2).

Aceste relații sînt:

a) $$\lg \varnothing_n = AN + B \qquad \text{(XVI.1)}$$

în care: $\varnothing_n$ este porozitatea determinată după diagrafii neutronice;
N — valoarea amplitudinii anomaliei de pe diagrafia neutronică, din dreptul intervalului studiat, exprimată în unități A:P:I;
A și B constante.

b) $$\varnothing_s = \frac{\Delta t_{diagr} - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m} \qquad \text{(XVI.2)}$$

în care: $\varnothing_s$ este porozitatea determinată după diagrafii sonice;
Δt_{diagr} — timpul de propagare a semnalelor acustice prin rocile investigate, în μs/m sau μs/picior;
Δt_m — timpul de propagare a semnalelor acustice prin matricea rocii, în μs/m sau μs/picior;
Δt_f — timpul de propagare a semnalelor acustice prin fluidele care saturează porii rocilor, în μs/m sau μs/picior.

Din relațiile XVI.1 și XVI.2, Schlumberger a dedus că mărimea amplitudinii anomaliei de pe diagrafia neutronică, N, este funcție de timpul de propagare a semnalelor acustice prin rocile investigate, Δt_{diagr}, deci:

$$N = f(\Delta t_{diagr}). \qquad \text{(XVI.3)}$$

Relația XVI.3 are valabilitate numai în cazul rocilor curate pentru care porozitatea determinată după diagrafiile sonice este aproximativ egală cu porozitatea determinată după diagrafiile neutronice, respectiv cînd:

$$\varnothing_s \approx \varnothing_n \qquad \text{(XVI.4)}$$

Abaca construită de Schlumberger, conform cu relația XVI.3, conține trei curbe, caracteristice pentru trei tipuri de roci: gresii, calcare și dolomite (v. fig. XVI.3).

Cu abaca din fig. XVI.3 nu se determină direct porozitatea rocilor, însă, indirect, este utilă în acest sens, deoarece prin intermediul ei este posibil să se determine cu mai multă acuratețe valoarea timpului de propagare a semnalelor acustice prin matricea rocilor (Δt_m); introducînd această valoare în relația XVI.2, se obține porozitatea rocilor investigate (valoarea lui Δt_f din relația XVI.2, variază în limite restrînse și se preia din tabelul 10).

Pentru determinarea vitezei de propagare a semnalelor acustice prin matricea unor roci Δt_m este necesar să se cunoască: 1) timpul de propagare a semnalelor acustice prin rocile investigate, Δt_{diagr}, în μs/m sau μs/picior, care se preia după diagrafia sonică și 2) valoarea N a amplitudinii anomaliei din dreptul intervalului studiat, exprimată în unități A.P.I, care se preia după diagrafia neutronică. Cunoscîndu-se valorile lui Δt_{diagr} și a lui N este posibil să se stabilească natura rocii studiate — gresie, calcar sau dolomit. Cunoscînd natura rocii, din tabele se află valoarea lui Δt_m (v. tabelul 10).

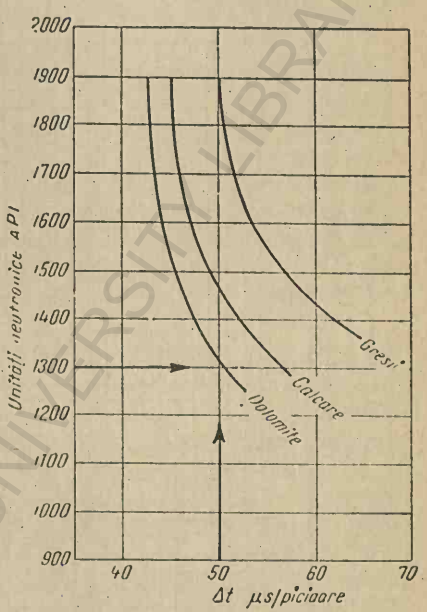


Fig. XVI.3. Abacă pentru determinarea porozității după diagrafii sonice și neutronice.

Exemplu de utilizare a abacei din fig. XVI.3. Se presupune că pe diagrafia sonică se citește în dreptul stratului studiat Δt_{diagr}=50 μs/picior iar pe diagrafia neutronică N=1 300 unități A.P.I.

Se notează pe abscisă valoarea lui Δt_{diagr} și din punctul înscris se ridică verticala; valoarea lui N se notează pe ordonată și din punctul înscris se trasează orizontala pînă intersectează verticala ridicată de pe abscisă. Punctul de intersecție a celor două drepte se situează în apropierea uneia din cele trei curbe ale abacei și astfel este posibil să se caracterizeze natura rocilor stratului studiat (gresie, calcar, sau dolomit). În cazul acestui exemplu, rocile stratului cercetat sînt dolomite. După datele din tabelul 10 se găsește că timpul de propagare a semnalelor acustice prin matrice Δt_m=43,5 μs/picior.

Cunoscînd: Δt_m=43,5 μs/picior; Δf=200 μs/picior (apă sărată conținînd 15% NaCl) și Δt_{diagr}=50 μs/picior, se obține porozitatea dolomitului cercetat și înlocuind aceste date în relația XVI.2 se găsește $\varnothing_s$=4,1%.

Schlumberger, perfecționînd abaca din fig. XVI.3, a construit abaca prezentată în fig. XVI.14 [4].

Cu noua abacă dual sonic-neutronic se pot determina atît porozitatea cît și natura rocilor. Această realizare este deosebit de importantă, deoarece după diagrafiile clasice de rezistivitate, laterolog și inductiv, acest lucru nu este posibil.

Abaca conține trei curbe caracteristice: pentru dolomit (v_m=25 000 pic/s), calcar (v_m=21 000 pic/s) și gresie (v_m=18 000 pic/s). Fiecare din cele trei curbe este divizată în termeni de porozitate, de la 0 la 40%. Valorile termenilor de porozitate de pe cele trei curbe, care reprezintă

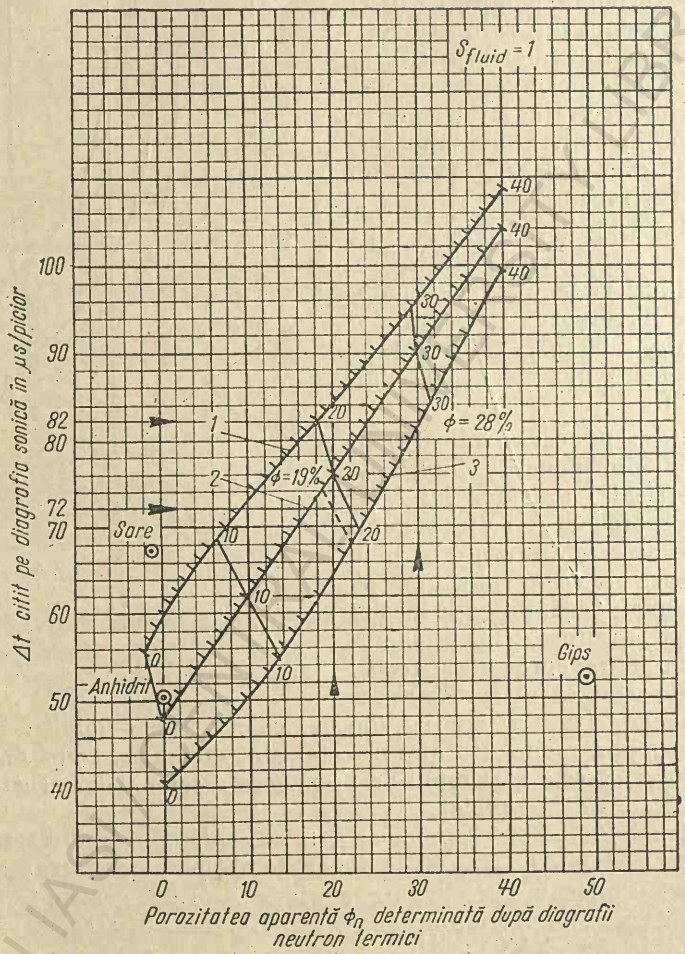


Fig. XVI.4. Abacă dual: sonică ... neutron-neutron termici pentru determinarea litologiei și porozității rocilor curate [4]: *1* — gresie avînd v_m=18 000 picioare/s; *2* — calcar avînd v_m=21 000 picioare/s; *3* — dolomit avînd v_m=25 000 picioare/s.

multiplu de 10%, sînt unite prin drepte, în scopul facilitării determinării porozității în cazurile de interpolare.

În abscisa abacei este înscrisă porozitatea aparentă determinată după diagrafii neutron-neutron termici ($\varnothing_{nnt}$) iar în ordonată timpul de propagare a semnalelor acustice prin rocile studiate, care se citește pe diagrafii sonice în μs/pic (Δt_{diagr}).

Modul de utilizare a abacei din fig. XVI.4 este redat prin exemplul următor: porozitatea aparentă determinată după diagrafia neutron-neutron termici este $\varnothing_{nnt}=30\%$, iar timpul de propagare a semnalelor acustice prin roci este $\Delta t_{diagr}=82$ μs/pic. Din punctul de pe abscisă în care porozitatea $\varnothing_{nnt}=30\%$ se ridică verticala pînă intersectează orizontala trasată prin punctul de pe ordonată care indică $\Delta t_{diagr}=82$ μs/pic.

Punctul de intersecție astfel obținut este situat pe curba caracteristică pentru dolomite ($v_m=25\ 000$ pic/s). Astfel roca studiată se va caracteriza a fi un dolomit. Pe curba menționată se va citi totodată și porozitatea reală a rocii, egală cu 28%.

În cazul cînd punctul de intersecție a orizontalei trasată prin punctul înscris pe ordonată, cu verticala trasată prin punctul înscris pe abscisă, se situează între două curbe caracteristice, se vor face interpolări, după cum este prezentat în exemplul următor: porozitatea aparentă determinată după diagrafia neutron-neutron termici este $\varnothing_{nnt}=20\%$, iar timpul de propagare a semnalelor acustice prin roci este $\Delta t_{diagr}=72$ μs/pic. Procedînd ca în cazul precedent se obține un punct situat între curbele caracteristice pentru calcare și dolomite. Prin faptul că punctul de intersecție este situat mai aproape de curba caracteristică de calcare se va caracteriza roca cercetată ca fiind un calcar dolomitizat. Pentru aflarea porozității calcarului dolomitizat se trasează prin punctul de intersecție o dreaptă mai mult sau mai puțin paralelă cu dreapta care unește punctele notate cu 20 de pe curbele caracteristice pentru calcare și dolomite. Punctul de intersecție a curbei caracteristice pentru calcare cu dreapta trasată ca mai sus reprezintă porozitatea reală a calcarului dolomitizat, respectiv 19%.

1.2. Determinarea litologiei și porozității rocilor după diagrafii neutronice și gama-gama

Schlumberger a construit o a doua abacă dual pentru determinarea litologiei și porozității rocilor (v. fig. XVI.5), plecînd de la dependența dintre porozitatea rocilor determinată după diagrafii neutron-neutron termici și densitatea globală a rocilor δ_g, plecînd de la relația:

$$\varnothing_n=f(\delta_g) \qquad \text{(XVI.5)}$$

Relația XVI.5 are valabilitate numai în cazul rocilor curate.

Abaca dual neutron ··· gama-gama conține, ca și precedenta, trei curbe caracteristice: pentru dolomit (δ_g=2,87 g/cm³), calcar (δ_g=271 g/cm³) și gresie (δ_g=2,65 g/cm³). Fiecare din cele trei curbe caracteristice este divizată în termeni de porozitate, de la 0 la 40%.

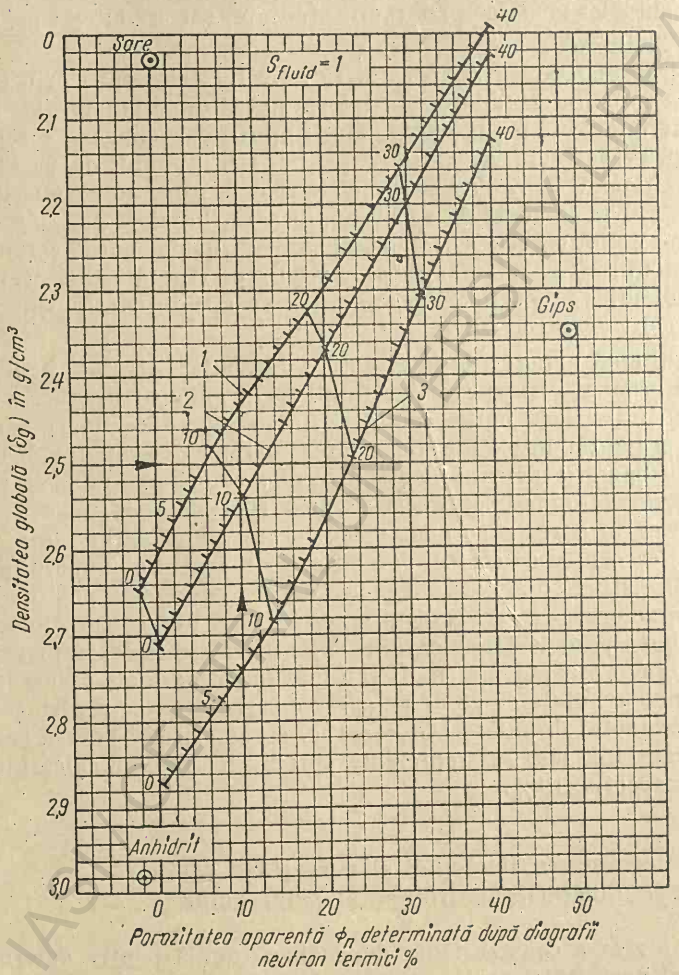


Fig. XVI.5. Abacă dual: neutron-neutron termici ... gama-gama compensată pentru determinarea litologiei și porozității rocilor curate [4]:

1 — gresie având densitatea matricei δ_m=2,65 g/cm³; *2* — calcar având δ_m=2,71 g/cm³; dolomit având δ_m=2,87 g/cm³.

În abscisa abacei este înscrisă porozitatea aparentă determinată după diagrafii neutron-neutron termici ($\varnothing_{nnt}$), iar în ordonată densitatea globală a rocii determinată după diagrafii gama-gama compensate, exprimată în g/cm³.

Modul de utilizare al abacei din fig. XVI.5 este redat prin exemplul ce urmează. Date: porozitatea aparentă, determinată după diagrafia neutron-neutron termici $\varnothing_{nnt}=10\%$, iar densitatea globală determinată după diagrafia gama-gama compensată $\delta_g=2{,}5$ g/cm³. Se notează pe abscisă valoarea lui $\varnothing_{nnt}$ și din punctul înscris se ridică verticala; valoarea lui δ_g se notează pe ordonată și din punctul înscris se trasează orizontala pînă intersectează verticala ridicată de pe abscisă.

Punctul de intersecție a celor două drepte se situează între curbele caracteristice pentru dolomite și gresii. Prin faptul că punctul de intersecție este situat mai aproape de curba caracteristică pentru calcare, roca cercetată se va caracteriza ca fiind un calcar grezos. Pentru aflarea porozității calcarului grezos se trasează prin punctul de intersecție o dreaptă, mai mult sau mai puțin paralelă cu dreapta care unește punctele care indică 10% unități de porozitate pe curbele caracteristice pentru calcare și gresii. Punctul de intersecție a curbei caracteristice pentru calcare cu dreapta trasată ca mai sus reprezintă porozitatea reală a calcarului grezos, respectiv 11%.

1.3. Determinarea litologiei și porozității rocilor după diagrafii sonice și gama-gama

A treia abacă construită de Schlumberger pentru determinarea litologiei și porozității rocilor (v. fig. XVI.6) are la bază dependența dintre timpul de propagare a semnalelor acustice prin rocile investigate Δt_{diagr} și densitatea globală a acestora δ_g, conform relației:

$$\Delta t_{arg}=f(\delta_g) \qquad \text{(XVI.6)}$$

Relația XVI.6 are valabilitate numai pentru roci consolidate curate.

Abaca dual sonic · · · gama-gama conține, ca și precedentele, trei curbe caracteritice pentru dolomit ($\delta_g=2{,}87$ g/cm³), calcar ($\delta_g=2{,}71$ g/cm³ și gresie ($\delta_g=2{,}65$ g/cm³), care sînt divizate în termeni de porozitate de la 0 la 40%.

În abscisa abacei este înscrisă timpul de propagare a semnalelor acustice prin rocile investigate (Δt_{diagr}) în μs/picior, iar în ordonată densitatea globală a rocii determinată după diagrafii gama-gama compensate, în g/cm³.

Modul de utilizare a abacei din fig. XVI.6 este asemănător cu al abacelor din figurile XVI.4 și XVI.5 și este redat prin exemplul ce urmează

Date: timpul de propagare a semnalelor acustice prin rocile investigate citit pe diagrafia sonică $\Delta t_{diagr}=90$ μs/pic, iar densitatea globală determinată după diagrafia gama-gama compensată $\delta_g=2{,}2$ g/cm³.

Intersecția dintre verticala ridicată din punctul de pe abscisă notat cu 90 μs/pic și orizontala trasată prin punctul de pe ordonată notat cu

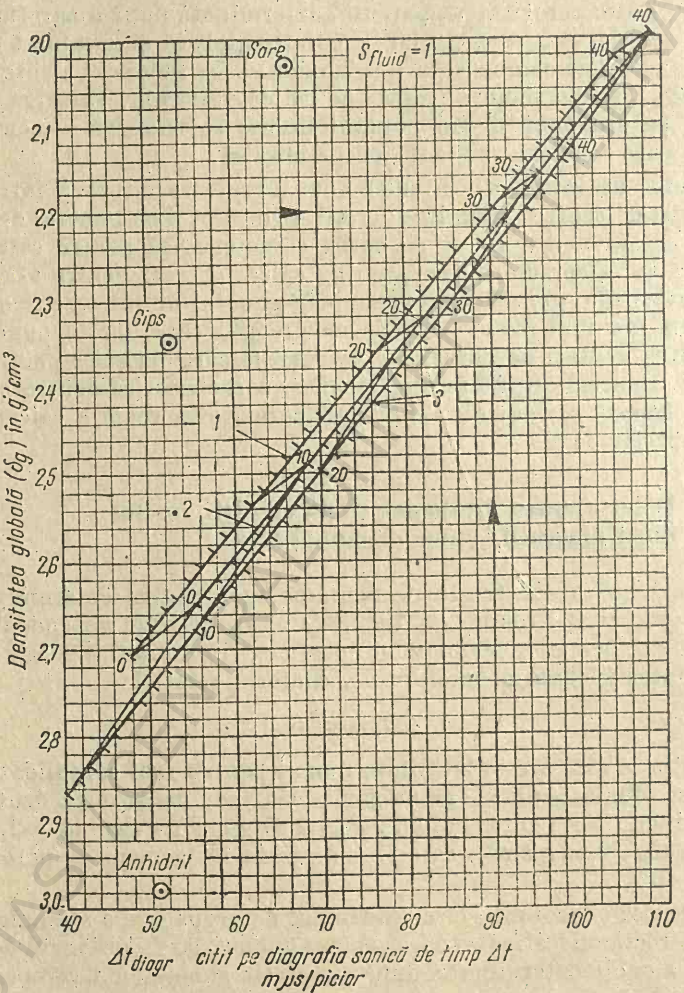


Fig. XVI.6. Abacă dual**ă: sonică** ... gama-gama compensată pentru determinarea litologiei și porozității rocilor curate [4]:
1 — calcar având $\delta_m=2{,}71$ g/cm³; *2* — gresie având $\delta_m=2{,}65$ g/cm³; *3* — dolomit având $\delta_m=2{,}87$ g/cm³.

2,2 g/cm^3, se situează pe curba caracteristică pentru gresii. Rocile din componența stratului stuidat se vor caracteriza ca fiind gresii a căror porozitate este de circa 30%.

1.4. Determinarea porozității reale a formațiunilor gazeifere

Schlumberger a stabilit o relație între porozitatea reală și porozitatea citită pe diagrafiile neutronice în cazul formațiunilor gazeifere [3]:

$$\varnothing_n = \varnothing [S_{gn} (a-1)+1] \qquad \text{(XVI.7)}$$

în care $\varnothing_n$ este porozitatea determinată după diagrafiile neutron-neutron, utilizînd abace, pentru un strat acvifer saturat 100% cu apă de zăcămînt;

$\varnothing$ — porozitatea reală;

S_{gn} — saturația în gaze a unui strat din zona investigată cu dispozitiv neutron-neutron;

a — raportul concentrației atomilor de hidrogen din apa de zăcămînt (c_{HW}) a unui strat gazeifer și concentrația atomilor de hidrogen din gazul conținut în același strat (c_{Hg}); mărimea a este proporțională cu presiunea gazului p și invers proporțională cu temperatura absolută T și cu coeficientul de compresibilitate a gazelor Z.

Raportul concentrațiilor $a = c_{HW}/c_{Hg}$ pentru metan are valoarea 0,436 p/TZ.

Schlumberger a arătat că pentru cazul stratelor gazeifere există o a doua relație între porozitatea reală, densitatea gazelor, densitatea matricei, saturația în gaze și densitatea dedusă din diagrafia gama-gama:

$$\delta_{\gamma\gamma} = \varnothing [S_{g\gamma\gamma}(b-1)+1]+(1-\varnothing)\,\delta_m \qquad \text{(XVI.8)}$$

în care $\delta_{\gamma\gamma}$ este densitatea globală a unui strat gazeifer determinată după diagrafii gama-gama compensate utilizînd abace;

$\varnothing$ — porozitatea reală;

$S_{g\gamma\gamma}$ — saturația în gaze a unui strat gazeifer investigat cu dispozitiv gama-gama compensat

b — o mărime care depinde de densitatea gazului. Această mărime este proporțională cu presiunea p a stratului și invers proporțională cu temperatura absolută T și cu coeficientul de compresibilitate a gazelor Z;

δ_m — densitatea matricei rocii gazeifere.

Pentru metan, mărimea b din relația XVI.8 are valoarea 0,192 p/TZ.

Notînd cu A cantităţile din paranteza mare a relaţiei XVI.7

$$A = S_{gn}(a-1)+1 \qquad \text{(XVI.9)}$$

iar cu B cantităţile din paranteza mare a relaţiei XVI.8

$$B = S_{g\gamma\gamma}(b-1)+1 \qquad \text{(XVI.10)}$$

şi aproximînd că cele două cantităţi sînt egale, atunci relaţiile XVI.7 şi XVI.8 se pot scrie:

$$\varnothing_n = A\varnothing \qquad \text{(XVI.11)}$$

$$\delta_{\gamma\gamma} = \varnothing A + (1-\varnothing)\,\delta_m \qquad \text{(XVI.12)}$$

Din relaţiile simplificate XVI.11 şi XVI.12 se obţine expresia prin care se calculează porozitatea reală a formaţiunilor gazeifere:

$$\varnothing = \frac{\delta_m + \varnothing_n - \delta_{\gamma\gamma}}{\delta_m} \qquad \text{(XVI.13)}$$

În cazul cînd saturaţia în gaze S_{gn} a unor roci determinată după diagrafii neutronice este aproximativ egală cu saturaţia în gaze determinată după diagrafii gama-gama compensate ($S_{g\gamma\gamma}$), atunci se obţine relaţia:

$$S_{gn} = \frac{\varnothing - \varnothing_n}{(1-a)\varnothing} \qquad \text{(XVI.14)}$$

Pentru determinarea expeditivă a porozităţii rocilor gazeifere, precum şi a saturaţiei lor, s-au construit abace care sînt soluţiile grafice a relaţiilor XVI.13 şi XVI.14.

În fig. XVI.7 se prezintă o abacă pentru determinarea porozităţii şi saturaţiei formaţiunilor gazeifere care este o soluţie grafică a relaţiilor XVI.13 şi XVI.14 în cazul cînd densitatea matricei rocilor este $\delta_m = 2{,}65$ g/cm³ (cazul gresiilor) şi cînd raportul concentraţiilor $a = c_{HW}/c_{Hg} = 0{,}25$.

În fig. XVI.8 se prezintă o a doua abacă pentru determinarea porozităţii şi saturaţiei formaţiunilor gazeifere, care este o soluţie grafică a relaţiilor XVI.13 şi XVI.14 în cazul cînd densitatea matricei rocilor δ_m este de 2,71 g/cm³ (cazul calcarelor) şi cînd raportul concentraţiilor $a = c_{HW}/c_{Hg} = 0{,}25$.

În fig. XVI.9 se prezintă a treia abacă pentru determinarea saturaţiei şi porozităţii formaţiunilor gazeifere, care de asemenea este o soluţie grafică a relaţiilor menţionate, în cazul cînd densitatea matricei rocii $\delta_m = 2{,}87$ g/cm³ (cazul dolomitelor) şi cînd raportul $a = c_{HW}/c_{Hg} = 0{,}25$.

Modul de utilizare a abacelor din figurile XVI.7, XVI.8 şi XVI.9 este identic. Pentru exemplificare se va descrie modul de folosire a abacei din fig. XVI.8.

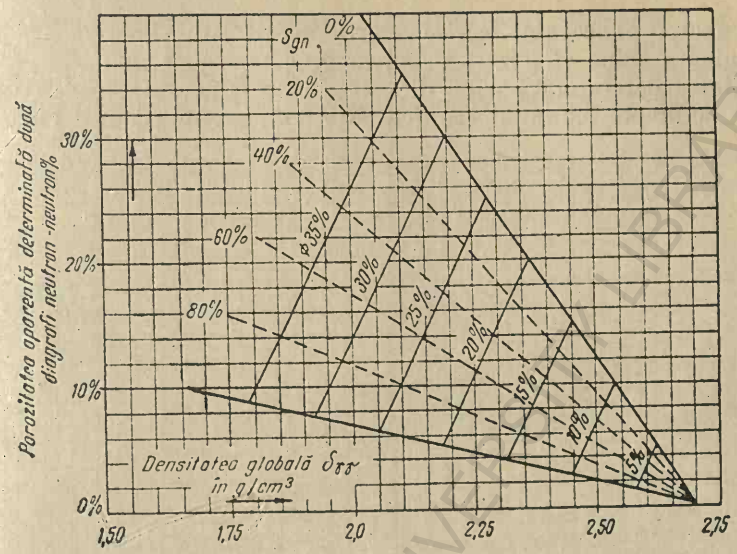


Fig. XVI.7. Abacă pentru determinarea porozității și saturației formațiunilor gazeifere constituite din gresii $\delta_m = 2{,}65$ g/cm³ [4].

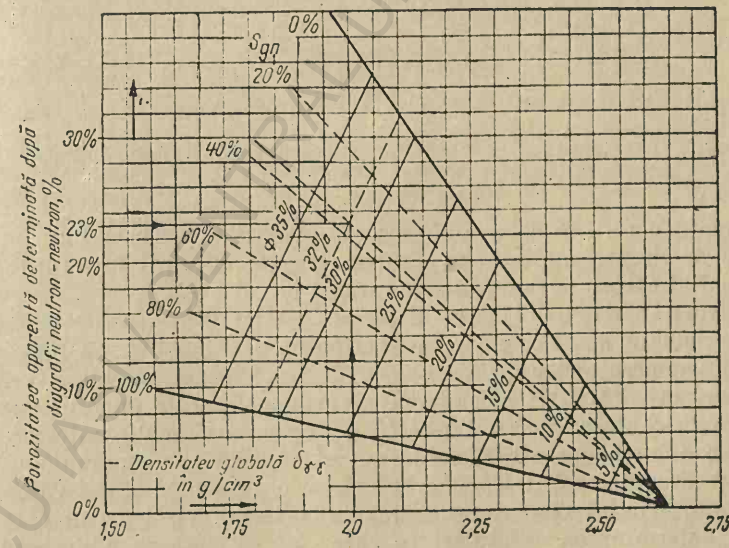


Fig. XVI.8. Abacă pentru determinarea porozității și saturației formațiunilor gazeifere constituite din roci calcaroase $\delta_m = 2{,}71$ g/cm³ [4].

În abcisa abacei sînt încrise valorile densității globale $\delta_{\gamma\gamma}$, în g/cm³, determinată după diagrafii gama-gama compensate, iar în ordonată porozitatea determinată după diagrafii neutron-neutron. Abaca conține o serie de drepte înclinate, paralele între ele, trasate cu linii pline, prin

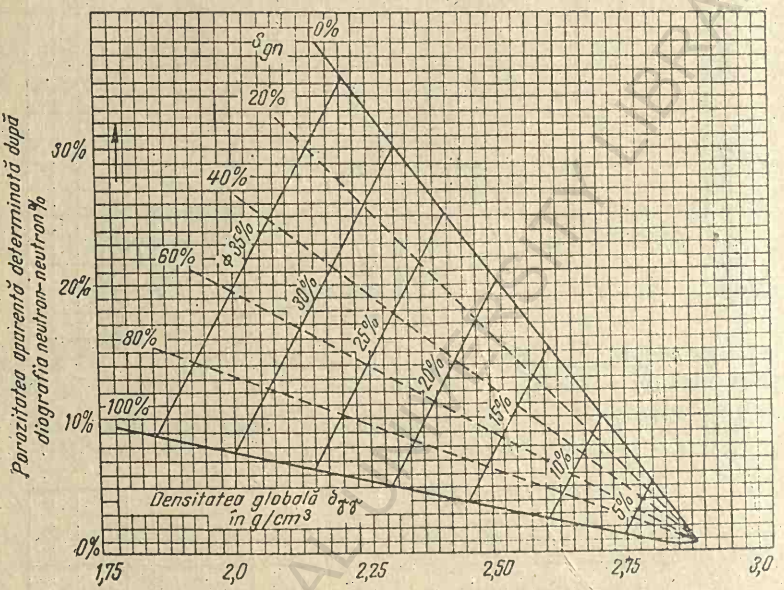


Fig. XVI.9. Abacă pentru determinarea porozității și saturației formațiunilor gazeifere constituite din roci dolomitice cu $\delta_m = 2{,}87$ g/cm³ [4].

intermediul cărora se determină porozitatea reală $\varnothing$. Abaca mai cuprinde o serie de drepte înclinate neparalele, trasate cu linii întrerupte, prin intermediul cărora se determină saturația în gaze S_{gn}.

Exemplu de utilizare a abacei din fig. XVI.7. Date: densitatea globală $\delta_{\gamma\gamma}=2$ g/cm³ și porozitatea $\varnothing_n=23\%$. Se notează pe abscisă valoarea densității $\delta_{\gamma\gamma}$ și din punctul înscris se ridică verticala; valoarea porozității $\varnothing_n$ se notează pe ordonată și din punctul înscris se trasează orizontala pînă intersectează verticala ridicată anterior. Pentru determinarea porozității reale $\varnothing$ se trasează prin punctul de intersecție o dreaptă paralelă cu dreptele pe care sînt notate valorile de porozitate. Prin interpolare se obține valoarea porozității reale $\varnothing=32\%$. Pentru determinarea saturației în gaze S_{gn} se trasează o dreaptă prin punctul de intersecție și punctul marcat pe abscisă cu 2,65. Prin interpolare se obține saturația în gaze $S_{gn}=35\%$.

1.5. Determinarea porozității vacuolare

Porozitatea vacuolară a rocilor carbonatate se poate determina prin combinarea parametrilor de porozitate deduși din diagrafiile sonice și gama-gama.

Pe diagrafiile gama-gama, după cum s-a arătat, se determină volumul total al porilor rocilor investigate, deci porozitatea intergranulară, porozitatea intercristalină și porozitatea vacuolară care în cele mai multe cazuri este de tip cavernos.

Pe diagrafiile sonice se determină obișnuit porozitatea intercristalină și intergranulară, deoarece dimensiunile porilor rocilor cu asemenea genuri de porozități sînt mai mici în comparație cu lungimile de undă ale semnalelor acustice. Relația lui Wyllie cu care se determină porozitatea rocilor pe diagrafiile sonice este valabilă numai pentru dimensiuni ale porilor mai mici decît lungimea de undă a semnalelor acustice.

Astfel, dacă se face o comparație între porozitatea determinată pe diagrafiile sonice $\varnothing_s$ și porozitatea determinată pe diagrafiile gama-gama $\varnothing_{\gamma\gamma}$ în roci carbonatate cu porozitate vacuolară între cele două valori de porozitate va exista o diferență apreciabilă; porozitatea determinată pe diagrafiile gama-gama va fi mai mare decît porozitatea determinată pe diagrafiile sonice, iar diferența dintre ele va reprezenta porozitatea vacuolară $\varnothing_v$;

$$\varnothing_{\gamma\gamma} - \varnothing_s = \varnothing_{vacuolar} \qquad \text{(XVI.15)}$$

Pentru selecționarea rapidă într-o formațiune cu roci carbonatate a eventualelor intervale în care acestea au porozitatea vacuolară, se construiește un grafic care conține două curbe teoretice ale vitezei de propagare în funcție de porozitate. Curbele de pe acest grafic (fig. XVI.10) rezultă din relația

$$\text{imp } \gamma\gamma/\text{s} = f(\Delta\ t) \qquad \text{(XVI.16)}$$

pentru două valori diferite ale lui v_m, de exemplu 6 900 m/s și 7 500 m/s.

Modul de utilizare al graficului din fig. XVI.10. Se înscriu în abscisă valorile vitezei de propagare a semnalelor acustice, măsurate pe diagrafia sonică la diverse nivele, iar în ordonată valorile corespunzătoare în imp/min, măsurate prin curba gama-gama. Din punctele respective se trasează verticale și orizontale, obținîndu-se astfel o serie de puncte. Seria punctelor care se situează în afara curbelor teoretice reprezintă intervalele în care rocile carbonatate au porozitate vacuolară.

Concluzii. Determinarea porozității rocilor după diagrafii impune o atenție deosebită, deoarece acest parametru se utilizează la determi-

narea saturației în hidrocarburi a formațiunilor productive. Ca urmare, se recomandă să se determine porozitatea prin mai multe metode și rezultatele obținute să fie comparate cu porozitățile determinate pe carote.

Date suplimentare despre porozitatea rocilor se găsesc în publicații de specialitate [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

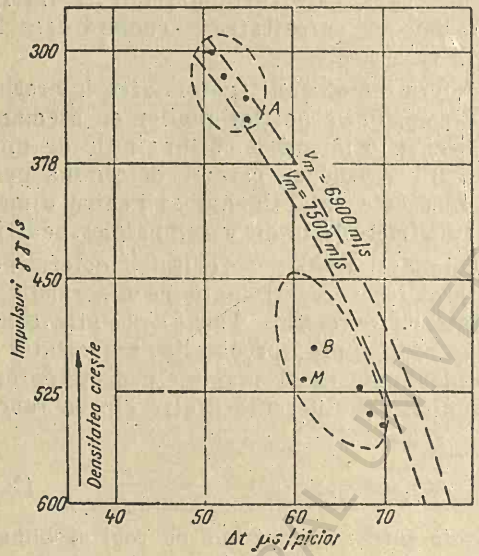


Fig. XVI. 10. Grafic pentru identificarea intervalelor în care rocile carbonatate au porozitate vacuolară [3].

2. DETERMINAREA SATURAȚIEI ROCILOR

La stabilirea saturației rocilor cu apă, petrol sau gaze este necesar să se cunoască care fluid umectează matricea rocii. Sînt două posibilități și anume: 1) particulele solide care constituie matricea rocii să fie umectate cu apă; 2) particulele solide ale matricei să fie umectate cu petrol.

În primul caz, o formațiune petroliferă înmagazinează petrolul în spațiile dintre particulele solide ale rocii, care sînt acoperite cu o peliculă de apă, și acesta este cazul cel mai frecvent întîlnit (fig. XVI.11,a). În cel de-al doilea caz, o formațiune petroliferă conține apa în spațiile dintre particulele solide ale rocii, care sînt acoperite cu o peliculă de petrol (v. fig. XVI.11,b).

Sînt o serie de criterii pentru a stabili dacă o rocă este umectată cu apă sau cu petrol. Cel mai obișnuit procedeu este de a cufunda în apă o bucată din roca extrasă prin carotaj mecanic. Dacă se separă pe-

trol atunci este umectată cu apă. Un al doilea procedeu, este de a analiza dacă valoarea PS după corectare este apropiată de PS-ul teoretic (PS_{st}) și în acest caz roca este umectată cu apă.

2.1. Determinarea saturației formațiunilor curate, umectate cu apă

Saturația cu apă a principalelor roci străbătute de foraje se determină cu relația stabilită de Archie sau cu relații care sînt deduse din aceasta:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{\rho_0}{\rho_r}} = \sqrt[n]{\frac{F\rho_w}{\rho_r}} \qquad \text{(XVI.16)}$$

în care: S_w este saturația în apă a formațiunii, în %;
n — exponentul saturației (=2);
ρ_w — rezistivitatea apei de zăcămînt în ohm.m;
ρ_r = rezistivitatea reală a zonei necontaminate în ohm.m;
ρ_0 — rezistivitatea formațiunii saturată 100% cu apă din zona necontaminată;
F — factorul de rezistivitate al formațiunii.

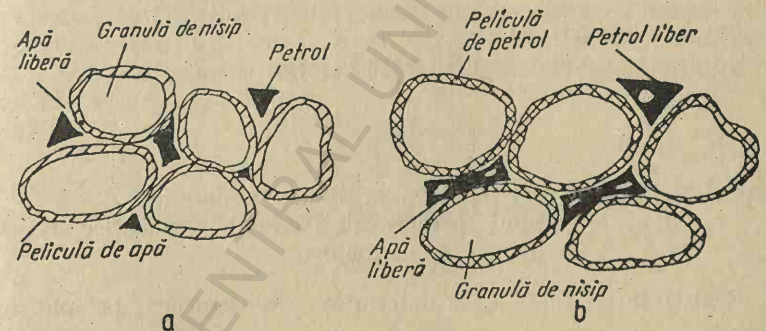


Fig. XVI.11. Reprezentare schematizată a umectării matricei rocilor: *a* — matrice umectată cu apă; *b* — matrice umectată cu petrol.

2.1.1. *Determinarea datelor necesare calculării saturației în apă a rocilor*

Pentru determinarea saturației S_w este necesară calcularea prealabilă a următoarelor date.

1. Factorul de rezistivitate al formațiunii F se determină din valorile de porozitate, utilizînd una din formulele:

$$F = \frac{1}{\varnothing^m}; \quad F = \frac{1}{\varnothing^{2,2}}; \quad F = \frac{0,62}{\varnothing^{2,15}} \qquad \text{(XVI.17)}$$

2. Rezistivitatea apei de zăcămînt ρ_w se determină pe mai multe căi:

— După diagrafiile PS, utilizînd abacele din fig. II.20, II.21 și II.22. Cînd rezistivitatea apei de zăcămînt este redusă, determinarea acesteia după profilele PS poate conduce la date eronate și nu este recomandabilă.

— Determinarea în laborator a rezistivității apei extrasă din strat, fie cu testerul, fie în timpul probării stratului. (Rezistivitatea apei determinată în laborator se corectează la temperatura stratului).

— După analiza chimică a apei de zăcămînt, utilizînd abaca din fig. I.1.

— Din cataloagele cu rezistivitățile sau salinitățile apelor de zăcămînt regionale.

— După datele rezistivității apelor de zăcămînt de la sondele vecine. Se iau în considerație numai datele privitoare la formațiuni de aceeași vîrstă.

— Utilizînd una din formulele:

$$\rho_w = \rho_0 \cdot \varnothing^m = \frac{\rho_0}{F}; \quad \rho_w = \rho_0 \varnothing^2 \qquad \text{(XVI.18)}$$

— După abacele Δt și ρ_r;

— În cazul argilelor se utilizează relația:

$$\rho_w = \rho_{arg} \cdot \frac{\Delta t_{arg} - 70}{500} \qquad \text{(XVI.19)}$$

în care ρ_{arg} este rezistivitatea argilelor în ohm.m;
Δt_{arg} — timpul parcurs de semnalele acustice în argile, exprimat în μs/picior.

3. Rezistivitatea reală ρ_r se determină, de asemenea, pe mai multe căi;

— În cazul sondelor săpate cu noroi pe bază de apă dulce ρ_r se determină după diagrafiile inductive (însă $\rho_r < 100$ ohm.

— În sondele săpate cu noroi pe bază de produse petroliere ρ_r se determină după diagrafiile inductive.

— În sondele săpate cu noroi sărat, ρ_r se determină după diagrafiile laterolog.

— În formațiunile cu zone de invadare adînci, pentru determinarea lui ρ_r se recomandă diagrafiile B.K.Z., sau curba laterală de 18 picioare.

4. Porozitatea $\varnothing$ sau factorul de rezistivitate F se recomandă să se determine după două metode și cînd este posibil datele obținute să se compare cu rezultatele măsurătorilor de porozitate pe carote.

Metodele de determinare a porozității sînt:

— După diagrafiile acustice, utilizînd abaca 17 de la cap. XII.

— După diagrafiile neutronice, utilizînd abaca 6 de la cap. X.

— După diagrafiile înregistrate cu microdispozitive utilizînd abaca 8 de la cap. IV.

— După diagrafiile gama-gama de densitate, utilizînd abacele 2 și 4 de la cap. XI.

— După abacele duale utilizînd abacele 4, 5 și 6 de la cap. XVI.

— În laborator, pe eșantioane din carote.

5. Rezistivitatea formațiunii saturată 100% cu apă de zăcămînt din zona necontaminată (ρ_0) se determină la fel ca și ρ_r (v. § XVI.3).

6. Factorul de cimentare m și exponentul saturației n se determină în laborator. În cazul cînd nu s-au făcut asemenea măsurători, pentru determinarea lui m este necesar să se cunoască natura rocilor și în acest caz se pot utiliza datele din tabelul 1, iar pentru n se ia valoarea 2.

2.1.2. *Metode de calculare a saturației în apă*

Metoda de comparație ρ_{wa} reprezintă unul din cele mai simple mijloace pentru detectarea stratelor cu hidrocarburi. Metoda constă în calcularea rezistivității aparente a apei ρ_{wa}, considerînd că stratul este saturat 100% cu apă de zăcămînt. În această ipoteză, ρ_{wa} se calculează din relația lui Archie:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{F \cdot \rho_{wa}}{\rho_r}} \qquad \text{(XVI.20)}$$

cum S_w se consideră $=1$, relația XVI.15 devine:

$$1 = \sqrt[n]{\frac{F \cdot \rho_{wa}}{\rho_r}} \text{ sau } 1 = \frac{F \cdot \rho_{wa}}{\rho_r} \qquad \text{(XVI.21)}$$

de unde $$\rho_{wa} = \frac{\rho_r}{F} \qquad \text{(XVI.22)}$$

În relația XVI.22, ρ_r se obișnuiește să se preia din diagrafiile inductive, iar F din diagrafiile sonice; atunci relația XVI.22 se scrie:

$$\rho_{wa} = \frac{\rho_{IL}}{F_s} \qquad \text{(XVI.23)}$$

Dacă $\rho_{IL} = \rho_0$, atunci $\rho_{wa} = \rho_w$

Dacă $\rho_{IL} > \rho_0$, atunci $\rho_{wa} > \rho_w$

Pe baza datelor statistice s-a stabilit că pentru:

$\rho_{wa} > 3\rho_w$ formațiunile sînt petrolifere.

Pentru determinarea rapidă a lui ρ_{wa} se utilizează abaca liniară din fig. XVI.12, fiind necesare următoarele date: viteza de propagare a semnalelor acustice prin matricea rocii v_m (se determină din tabele şi pentru aceasta trebuie să se cunoască natura formaţiunilor); timpul Δt în μs/picior, citit pe diagrafiile sonice în dreptul stratului studiat; rezistivitatea aparentă a acestuia ρ_A şi rezistivitatea apei de zăcămînt ρ_w.

Modul de utilizare a abacei din fig. XVI. 12 este redat printr-un exemplu. Date: v_m=14 000 pic/s; Δt=94 μs/pic; ρ_A=10 ohm.m; ρ_w=0,1 ohm.m.

Se alege scala verticală Δt corespunzătoare pentru v_m=14 000 pic/s. Prin punctul notat cu 94 de pe scala Δt aleasă, se trasează o dreaptă orizontală şi se prelungeşte pînă intersectează scala F_s, pe care se citeşte valoarea lui F_s=20. Se înscrie pe scala ρ_A valoarea rezistivităţii aparente ρ_A=10 ohm.m. Prin punctul de pe scala F_s notat cu 20 se trasează o dreaptă care trece prin punctul notat cu 10 de pe scala ρ_A; dreapta se prelungeşte pînă intersectează scala ρ_{wa} pe care se citeşte valoarea lui ρ_{wa}=0,5. În continuare se calculează raportul:

$$\frac{\rho_{wa}}{\rho_w}=\frac{0,5}{0,1}=5$$

Stratul studiat este posibil petrolifer, deoarece valoarea raportului $\rho_{wa}/\rho_w>3$.

Metoda de comparaţie F_r/F_s aproximează indicele de rezistivitate care indică prezenţa hidrocarburilor din zona invadată (este un indicator al hidrocarburilor reziduale).

Timpul de propagare a semnalelor acustice Δt nu depinde în general de saturaţia în hidrocarburi reziduale (S_{Hr}). Ca urmare, factorul de rezistivitate al formaţiunii F_s, calculat cu formula $F_s=0,62/\varnothing_s^{2,15}$, de asemenea nu va depinde de saturaţia în hidrocarburi reziduale. Rezistivitatea aparentă măsurată în zona invadată va fi influenţată de prezenţa hidrocarburilor reziduale, deci şi factorul de rezistivitate F_r va fi influenţat de prezenţa acestora. Pentru determinarea factorului de rezistivitate trebuie determinată rezistivitatea zonei invadate; în acest scop se utilizează dispozitive cu rază mică de investigare (dispozitiv normal scurt avînd lungimea 16 in, microlaterolog, proximitilog sau lerolog 8)·

$$F_r=\frac{\rho_{MLL}}{\rho_f};\quad F_r=\frac{\rho_{16''}}{\rho_f}\ \text{(etc.)}\qquad\text{(XVI.24)}$$

Dacă zona investigată este complet spălată, atunci raportul F_r/F_s=1. În acest caz, formaţiunea este acviferă, deoarece numai în cazul acestor formaţiuni fluidele conţinute iniţial pot fi înlocuite cu filtrat.

Pentru nisipuri şi în general pentru formaţiunile petrolifere raportul F_r/F_s este mai mare decît 1, deoarece oricît de intensă ar fi spălarea formaţiunii cu filtrat, în jurul găurii de sondă tot rămîn hidrocarburi reziduale.

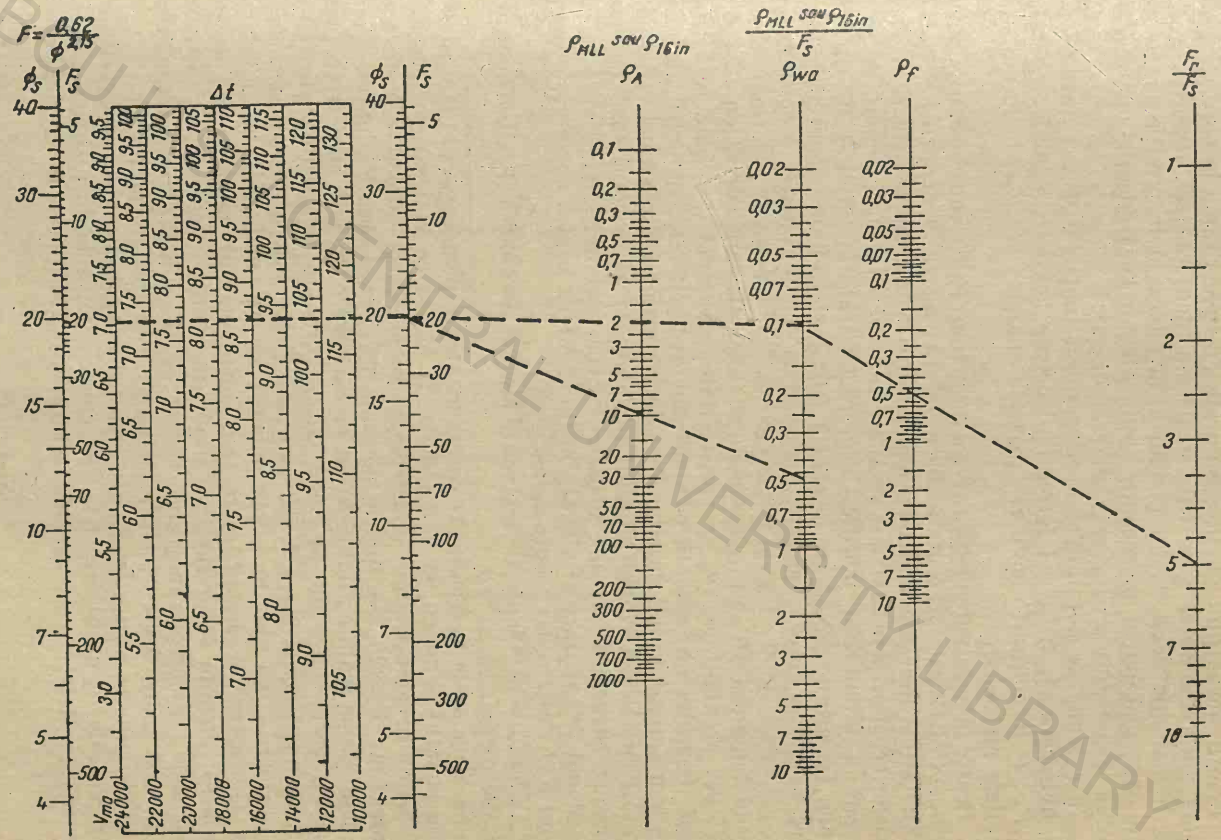


Fig. XVI.12. Abacă liniară pentru determinarea ρ_{wa} și a raportului $\frac{F_r}{F_s}$ [12].

POLITEHNICA UNIVERSITY LIBRARY

Pentru formațiuni acvifere saturate cu apă sărată, la care spălarea zonei din vecinătatea găurii de sondă s-a făcut parțial, raportul F_r/F_s va fi mai mic decît 1. La nisipurile argiloase și la gresiile argiloase, care sînt mai puțin permeabile decît nisipurile și gresiile curate, valoarea raportului F_r/F_s este extrem de mică.

În rezumat se pot întîlni următoarele situații: $F_r/F_s>1$ formațiuni cu hidrocarburi; $F_r/_sF=1$ formațiuni curate acvifere, complet spălate; $F_r/F_s<1$ formațiuni acvifere parțial spălate; $F_r/F_s\ll 1$ formațiuni acvifere marnoase.

Pentru determinarea expeditivă a raportului F_r/F_s s-au construit abace. În fig. XVI.12 este prezentată abaca liniară construită de firma P.G.A.C [12]. Datele necesare utilizării abacei sînt: viteza de propagare a semnalelor acustice prin matricea rocii stratului studiat v_m; timpul de propagare a semnalelor acustice prin roca stratului studiat Δt, în μs/picior (se citește pe diagrafia sonică Δt); rezistivitatea zonei invadate, care se preia după diagrafii înregistrate cu dispozitiv microlaterog (ρ_{MLL}), sau după diagrafii înregistrate cu dispozitiv normal scurt avînd lungimea 16 in ($\rho_{16''}$), sau după diagrafii înregistrate cu dispozitiv de proximitate (ρ_{PL}); rezistivitatea aparentă (ρ_A) care se preia după diagrafia înregistrată cu unul din dispozitivele: inductiv, laterolog sau lateral avînd lungimea de 18 picioare; rezistivitatea filtratului (ρ_f) care se determină obișnuit în laborator și se corectează la temperatura stratului studiat utilizînd abaca din fig. I.1.

Modul de utilizare al abacei din fig. XVI.12 pentru obținerea raportului F_r/F_s este redat printr-un exemplu.

Date: $v_m=14\,000$ pic/s; $\rho_{MLL}=2$ ohm.m; $\rho_A=2$ ohm.m $\rho_f=0{,}5$ ohm.m; $\Delta t=94$ μs/pic.

Se alege scala verticală Δt corespunzătoare pentru $v_m=14\,000$ pic/s. Prin punctul notat cu 94 de pe scala Δt aleasă ca mai sus se trasează o dreaptă orizontală pînă intersectează scala F_s, pe care se citește valoarea lui $F_s=20$. Se înscrie pe scala ρ_{MLL} valoarea 2 ohm.m. Prin punctul de pe scala F_s notat cu 20 se trasează o dreaptă care trece prin punctul notat cu 2 de pe scala ρ_{MLL}; dreapta se prelungește pînă intersectează scala ρ_{MLL}/ρ_f pe care se citește 0,1. Se înscrie pe scală ρ_f valoarea 0,5 ohm.m. Prin punctul de pe scala ρ_{MLL}/ρ_f notat cu 0,1 se trasează o dreaptă care trece prin punctul notat cu 0,5 de pe scala ρ_f; dreapta se prelungește pînă intersectează scala F_r/F_s pe care se citește valoarea raportului căutat: $F_r/F_s=5$. Valoarea raportului fiind mai mare decît 1, stratul studiat este posibil petrolifer.

Determinarea saturației S_w din raportul ρ_r/ρ_0 (indicele de rezistivitate) este posibilă în cazul formațiunilor curate, de exemplu nisipuri, gresii, calcare etc. Relația care exprimă saturația S_w în funcție de ρ_r și ρ_0 este:

$$S_W=\sqrt[n]{\frac{\rho_0}{\rho_r}}, \qquad \text{(XVI.25)}$$

iar relația care redă saturația în hidrocarburi este

$$S_H = 1 - S_w \qquad \text{(XVI.26)}$$

Soluția grafică a relațiilor XVI.25 și XVI.26 este redată în abaca din fig. XVI.13 și se aplică stratelor la care se cunoaște limita dintre petrol și apă, stratelor distincte din aceeași formațiune care au porozități apropiate, precum și apelor de zăcămint cu aproximativ aceleași rezistivități.

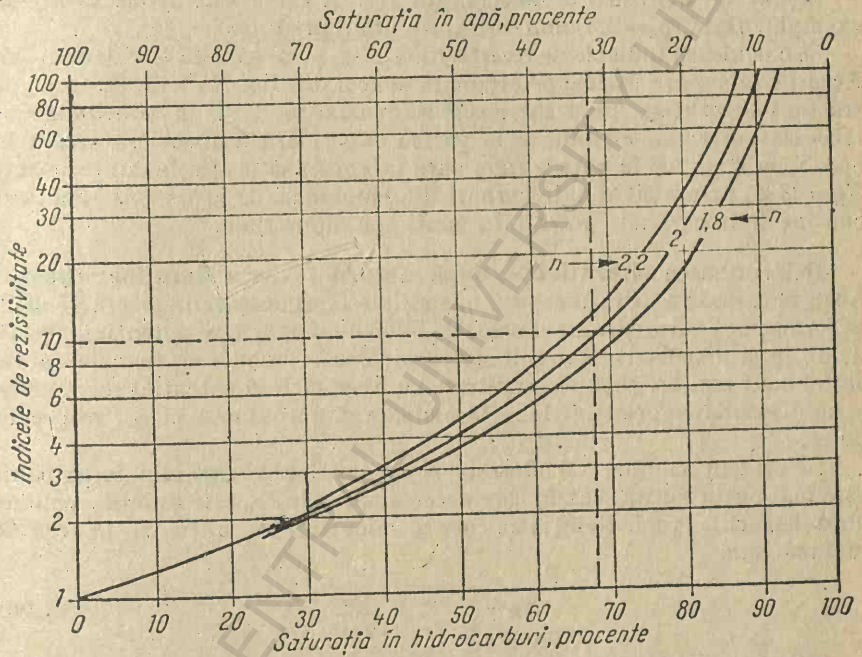


Fig. XVI.13. Abacă pentru determinarea saturației în apă S_w și a saturației în hidrocarburi reziduale S_{Hr} a rocilor curate, utilizînd raportul ρ_r/ρ_0 [12].

Datele necesare pentru utilizarea abacei din fig. XVI.13 sînt următoarele:

ρ_0 — rezistivitatea unui strat, sau a părții dintr-un strat petrolifer saturat 100% cu apă de zăcămînt.

Cînd ρ_0 nu se poate citi direct pe diagrafiile de rezistivitate, atunci se calculează cu relația:

$$\rho_0 = F\rho_w = \frac{1}{\varnothing^m}\rho_w \qquad \text{(XVI.27)}$$

Rezistivitatea apei de zăcămînt ρ_w din relația XVI.27, în acest caz se deduce din profilul PS sau din rezistivitatea argilelor, utilizînd relația XVI.19;

ρ_r — rezistivitatea reală a stratului care se presupune a fi petrolifer sau gazeifer se preia după una din diagrafiile de rezistivitate înregistrate cu dispozitiv inductiv, laterolog, sau lateral avînd lungimea 18 picioare.

Modul de utilizare al abacei din fig. XVI.13 este redat printr-un exemplu. Date: $\rho_0=0{,}5$ ohm·m; $\rho_r=5$ ohm·m și $n=2$.

Se calculează indicele de rezistivitate ρ_r/ρ_0 și se găsește $I_r=10$ ohm·m. Această valoare se înscrie pe ordonata abacei din fig. XVI.13, de unde se trasează orizontala pînă intersectează curba $n=2$ și în continuare se trasează verticala, citindu-se la partea superioară a abacei saturația în apă $S_w=32\%$, iar la partea inferioară (abscisă) saturația în hidrocarburi $S_H=68\%$. Saturația în hidrocarburi fiind mai mare de 50% stratul analizat conține hidrocarburi, posibil în cantități industriale.

Determinarea saturației S_w după metoda Tixier a Munților Stîncoși. Această metodă a fost concepută inițial în scopul obținerii valorii S_w și Ø în formațiuni dure, curate și invadate, folosind dispozitive potențiale scurte de 16 in și dispozitive laterale de 18 picioare. Trebuia ca invazia să fie astfel încît rezistivitățile înregistrate cu dispozitivul potențial scurt 16 in și cu dispozitivul gradient lung 18 picioare să aproximeze pe ρ_{zi} respectiv pe ρ_r.

În prezent metoda se folosește și în cazul cînd apa din formațiuni este mai puțin sărată, caz în care determinarea lui ρ_0 este dificilă, conducînd deseori la erori. Relația cu care se calculează saturația S_w în această metodă este:

$$S_w=\sqrt{\frac{\rho_{zi}}{\rho_r}\cdot\frac{\rho_w}{\rho_{wzi}}} \qquad \text{(XVI.28)}$$

Deoarece rezistivitatea apei din zona invadată ρ_{wzi} se determină greoi, ea s-a înlocuit cu ρ_f și relația XVI. 28 devine:

$$S_w=\sqrt{\frac{\rho_{zi}}{\rho_r}\cdot\frac{\rho_w}{\rho_f}} \qquad \text{(XVI.29)}$$

Tixier a construit o abacă liniară a metodei Munților Stîncoși cu care se calculează expeditiv saturația în apă S_w și porozitatea Ø. În fig. XVI.14 se prezintă această abacă.

Datele necesare pentru utilizarea abacei din fig. XVI.14 sînt următoarele: rezistivitatea reală a stratului ρ_r, care se preia după una din diagrafiile de rezistivitate înregistrate cu unul din dispozitivele laterolog, inductiv,

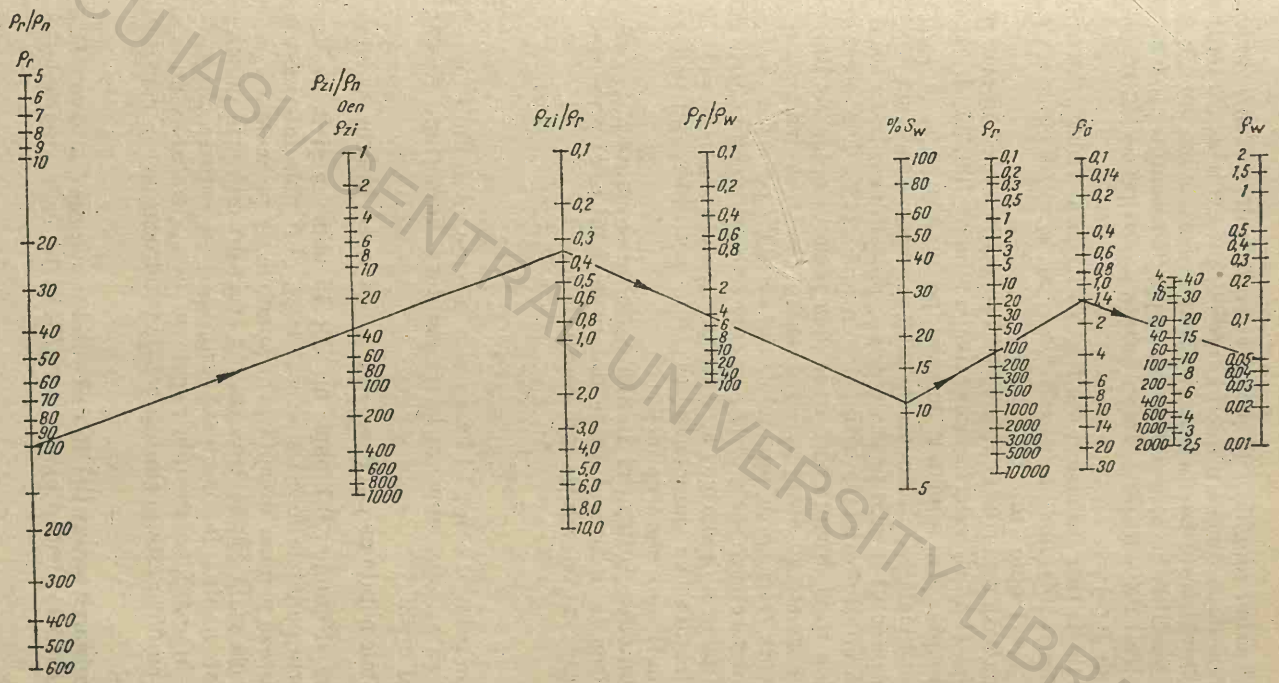


Fig. XVI.14. Abacă liniară pentru determinarea saturației S_{w} — metoda Munților Stîncoși, pentru formațiuni curate [3].

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

sau lateral avînd lungimea 18 picioare; rezistivitatea zonei invadate ρ_{zi}, care se preia după diagrafii microlaterolog, proximitilog, laterolog 8 sau diagrafii înregistrate cu dispozitiv normal scurt avînd lungimea 16 in; rezistivitatea filtrului ρ_f; rezistivitatea apei de zăcămînt ρ_w, care se deduce din profilul PS sau se determină printr-un alt procedeu; rezistivitatea noroiului de foraj ρ_n.

Modul de utilizare a abacei din fig. XVI.14 este redat printr-un exemplu. Date: $\rho_r=100$ ohm · m; $\rho_{zi}=35$ ohm · m; $\rho_f=0{,}20$ ohm · m; $\rho_w=0{,}05$ ohm · m; $\rho_n=1$ ohm · m.

Se calculează raportul ρ_f/ρ_w și se găsește egal cu 4. Se înscriu pe scalele ρ_f/ρ_n, ρ_{zi}/ρ_n și ρ_f/ρ_w valorile respective și anume: 100; 35; 4. Se trasează apoi o dreaptă prin punctele înscrise pe scalele ρ_r/ρ_n și ρ_{zi}/ρ_n, pînă intersectează scala ρ_{zi}/ρ_r; din acest punct se trasează o a doua dreaptă care trece prin punctul înscris pe scala ρ_f/ρ_w, pînă intersectează scala % S_w, pe care se citește valoarea saturației în apă=11%. Din acest punct se trasează o a treia dreaptă care trece prin punctul notat cu 100 pe scala ρ_r pînă intersectează scala ρ_0. Din acest punct se trasează o a patra dreaptă, care trece prin punctul notat cu 0,05 pe scala ρ_w. Această dreaptă intersectează scala $\varnothing$ (F) pe care se citește porozitatea $\varnothing=17\%$.

Saturația în hidrocarburi a stratului $S_H=(1-S_w)\ 100=(1-11)100=89\%$. Stratul se va caracteriza ca fiind petrolifer, întrucît saturația S_H este mult mai mare de 50%.

Determinarea saturației în apă S_w cînd se cunosc ρ_w, ρ_r și $\varnothing$ sau F. În acest scop se utilizează abace liniare de felul celei prezentate în fig. XVI.15, care este o soluție grafică a relației

$$S_w=\sqrt[n]{\frac{0{,}62\,\rho_w}{\rho_r\varnothing^{2{,}15}}}=\sqrt[n]{\frac{F\cdot\rho_w}{\rho_r}} \qquad \text{(XVI.30)}$$

Exemplu de utilizare a abacei din fig. XVI.15. Se consideră $\rho_w=0{,}1$ ohm · m la temperatura formațiunii $F=30$, $\rho_r=15$ ohm · m și $n=2$.

Pe scalele notate cu ρ_w, $F=\frac{0{,}62}{\varnothing^{2{,}15}}$; ρ_r și n se înscriu valorile corespunzătoare și anume: 0,1 ohm · m; 30; 15 ohm · m și 2. Se trasează o dreaptă prin punctele înscrise pe scalele ρ_w și F pînă intersectează scala ρ_0; se trasează a doua dreaptă prin punctele de pe scalele ρ_0 și ρ_r pînă intersectează scala S_w^n; se trasează o a treia dreaptă prin punctele de pe scale S_w^n și n pînă intersectează scala S_w, pe care se citește valoarea saturației în apă S_w a stratului, egală cu 45%. Stratul avînd o saturație S_H egală cu 55% este posibil să conțină hidrocarburi în cantități industriale.

Determinarea saturației în apă cînd se cunosc ρ_r, $\varnothing$ sau F. În acest scop se utilizează abaca liniară din fig. XVI.16, care este o soluție grafică

a relației XVI.30, luîndu-se în considerare saturația în hidrocarburi reziduale (S_{Hr}) și diametrul zonei invadate (d_{zi}).

Firma P.G.A.C., care a construit această abacă liniară, o recomandă să fie utilizată numai cînd se pot face corecții pentru diametrul zonei invadate și cînd se poate estima saturația în hidrocarburi reziduale.

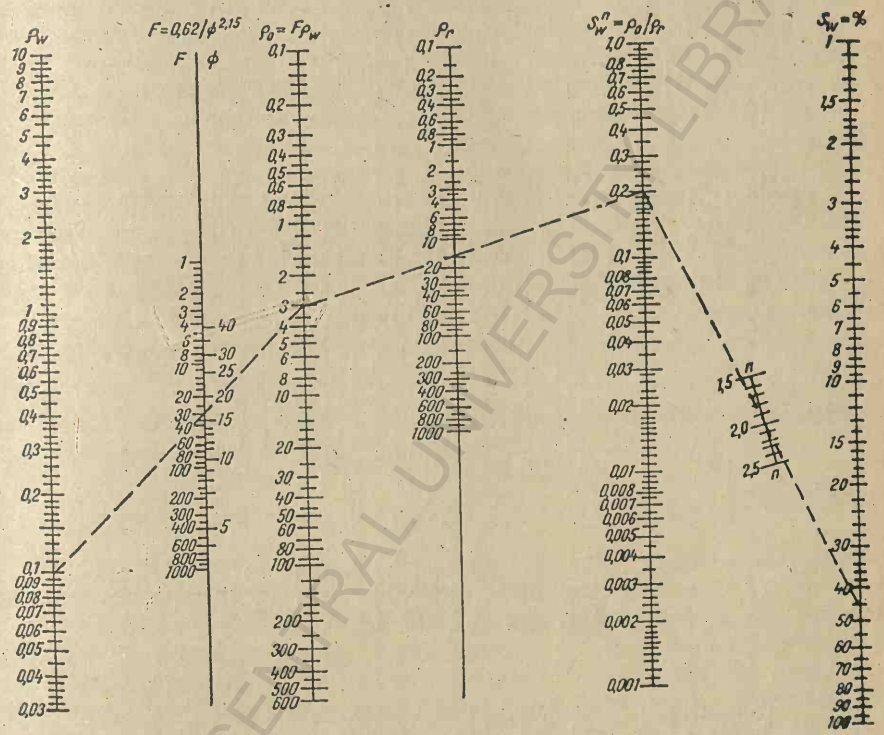


Fig. XVI.15. Abacă liniară pentru determinarea saturației S_{w} cînd se cunosc ρ_w, ρ_r și o sau F — formațiuni curate [12[.

Diametrul zonei invadate, dacă nu se poate determina după diagrafiile de rezistivitate clasică, se determină în funcție de porozitatea rocilor, utilizînd datele din tabelul 2. Estimarea procentului de hidrocarburi reziduale (S_{Hr}%) se face după datele din tabelul 2.

Exemplu de utilizare a abacei din fig. XVI.16. Se consideră următoarele date: $F=20$; $\rho_f=0{,}1$ ohm · m; $\rho_{LL3(h)}=15$ ohm · m; $S_{Hr}=20\%$; $d_{zi}=40$ in; $\rho_f=0{,}1$ ohm · m și $\rho_w=0{,}066$ ohm · m.

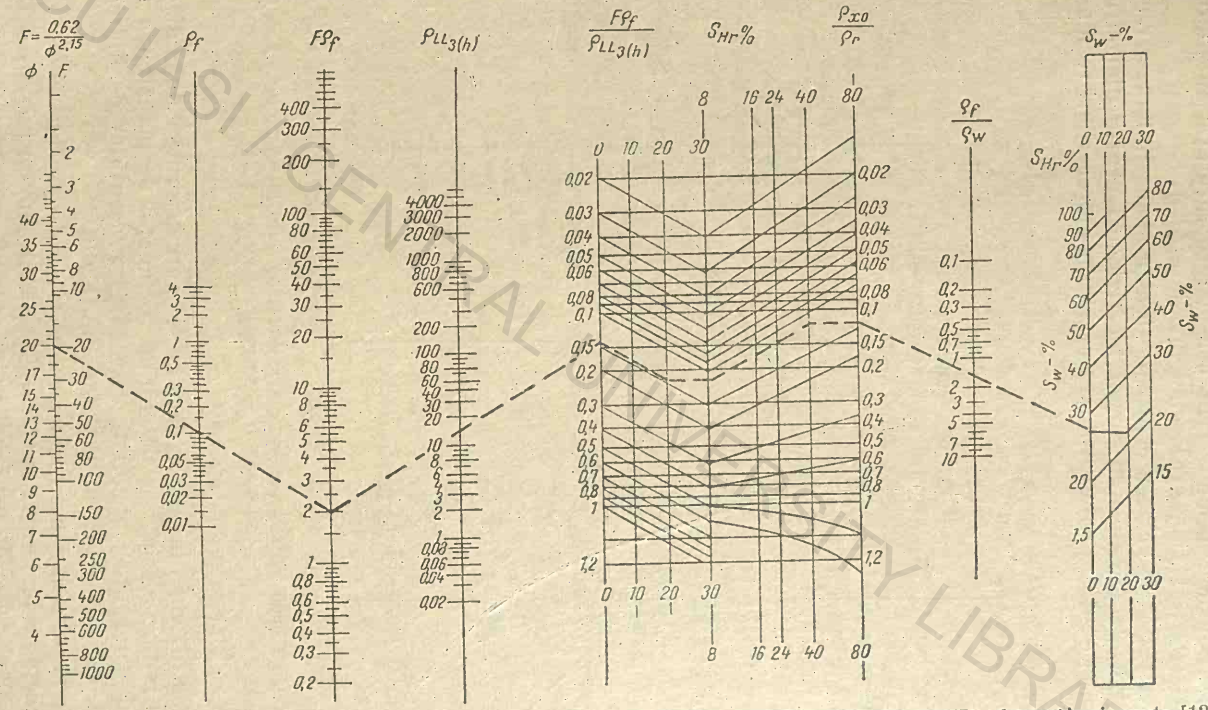


Fig. XVI.16. Abacă liniară pentru determinarea saturației S_w cînd se cunosc : ρLL_3 și o sau F — formațiuni curate [12].

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Se calculează raportul $\rho_f/\rho_w=1,5$ și se înscrie valoarea pe scala respectivă. Se înscriu pe scalele F, ρ_f, $\rho_{LL3(h)}$, S_{Hr} și d_{zi} valorile respective și anume: 20; 0,1; 15; 20% și 40 in.

Prin punctele înscrise pe scalele F și ρ_f se trasează o dreaptă pînă intersectează scala $F\rho_f$; din acest punct și prin cel înscris pe scala $\rho_{LL3(h)}$ se trasează o a doua dreaptă pînă intersectează scala $F\rho_f/\rho_{LL3(h)}$; din acest punct se trasează o dreaptă paralelă cu liniile înclinate pînă intersectează linia 20% S_{Hr}, de unde se trasează orizontala pînă intersectează dreapta verticală notată cu 30% S_{Hr}; din acest punct se duce o dreaptă paralelă cu liniile înclinat ale abacei pînă intersectează dreapta $d_{zi}=40$in, de unde se trasează orizontala pînă intersectează scala ρ_{x_0}/ρ_r; din acest punct se duce dreapta care trece prin punctul înscris pe scala $\rho_f/\rho_w=1,5$ și se prelungește pînă intersectează scala S_{Hr}%; din punctul respectiv se trasează orizontala pînă intersectează linia $S_{Hr}=20$% și în continuare se duce o dreaptă paralelă cu liniile înclinate ale abacei, care intersectează scala S_w% pe care se citește saturația stratului studiat, egală cu 22%.

Saturația în hidrocarburi a stratului $S_H=(1-S_w)100=(1-22)100=$ $=78$%. Stratul se va caracteriza ca petrolifer, întrucît saturația S_H este mult mai mare de 50%.

Determinarea saturației în apă după diagrafii acustice și de rezistivitate. Metoda are la bază ecuații Archie sau Humble:

$$S_w=\sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_r\varnothing^2}};\quad S_w=\sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_r\varnothing^{2,15}}};\quad S_w=\sqrt{\frac{0,62\rho_w}{\rho_r\varnothing^{2,15}}}. \qquad \text{(XVI.31)}$$

În fig. XVI.17 se prezintă unul din cele trei grafice care se pot construi avînd la bază una din relațiile de mai sus.

Construcția graficului constă în trasarea dreptei care unește toate punctele de aceeași saturație, ca de exemplu a punctelor caracteristice stratelor saturate 100% cu apă de zăcămînt. În acest scop se alege un strat saturat 100% cu apă de zăcămînt. Astfel de strate se disting pe diagrafia PS prin anomalii cu amplitudini negative mari, iar pe curbele ρ_A valorile de rezistivitate aparentă sînt reduse. În dreptul stratului ales se măsoară ρ_0, Δt și se determină ρ_w după profilul PS sau după unul din procedeele indicate anterior. Cunoscînd pe Δt, se calculează porozitatea ø sau factorul de rezistivitate F al stratului ales, utilizînd relația XVI.2 sau abaca din fig. XII.17.

Primul punct prin care va trece dreapta care unește punctele caracteristice saturației 100% cu apă de zăcămînt se determină astfel: Se înscrie în ordonată valoarea ρ_0 și se trasează orizontală pînă intersectează verticala ridicată din punctul de pe abscisă, care reprezintă una din mărimile ø, F sau Δt. Al doilea punct se înscrie după ce se calculează coordonatele acestuia astfel: se alege arbitrar un factor de rezis-

tivitate F', care multiplicat cu ρ_w conduce la obținerea lui ρ_0' ca fiind egal cu $F'\rho_w$. În felul acesta s-au obținut coordonatele celui de-al doilea punct $(F'\rho_0')$.

Obișnuit, graficul conține încă două drepte: $S_w=50\%$ și $S_w=25\%$. Coordonatele punctelor prin care se trasează dreapta $S_w=50\%$ sînt

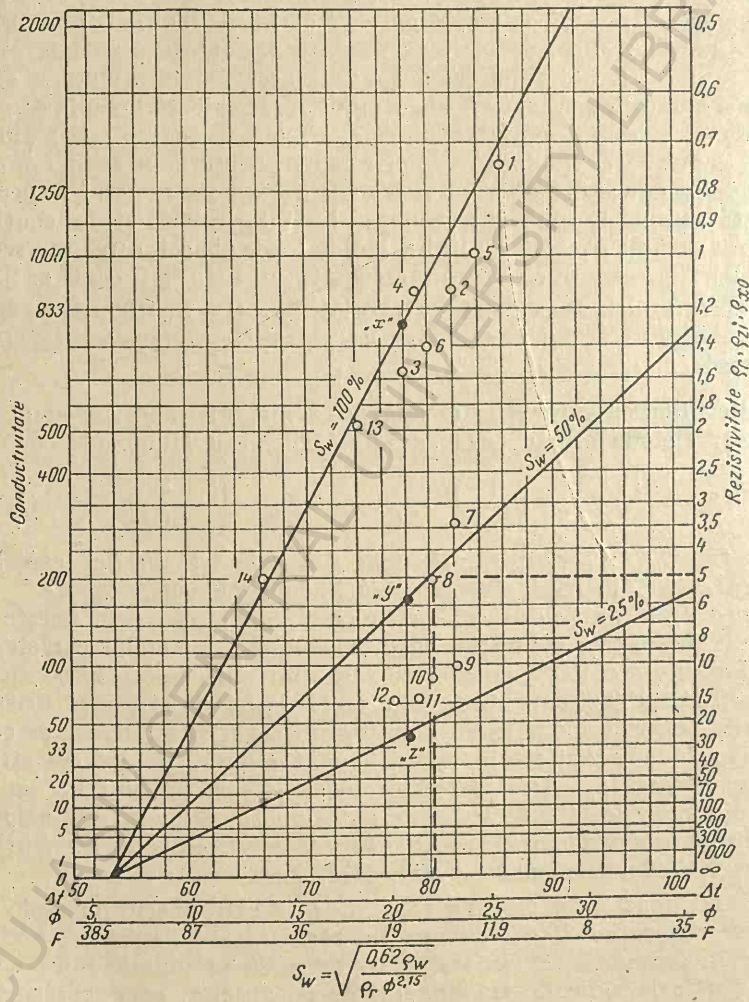


Fig. XVI.17. Grafic pentru determinarea saturației S_w cînd se cunosc: ρ_0, ρ_r, $(\rho_{zt}, \rho_{x0})\rho_w(\rho_{wzi}, \rho_f)$ și $\varnothing$ $(\Delta t, F)$ [12].

BCU CLUJ UNIVERSITY LIBRARY

(F, 4 ρ_0) și (F', 4 ρ_0'), iar ale punctelor prin care se trasează dreapta S_w=25% sînt (F, 6 ρ_0) și (F', 6 ρ_0').

După trasarea dreptelor S_w=100%, S_w=50% și S_w=25% se înscriu punctele caracteristice stratelor poroase și permeabile pentru care s-au determinat F și ρ_r.

Stratele corespunzătoare punctelor situate în jurul dreptei S_w=100% vor fi caracterizate ca acvifere (cazul stratelor reprezentate prin punctele 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13 și 14 din fig. XVI.17). Stratele corespunzătoare punctelor situate imediat deasupra dreptei S_w=50% vor fi caracterizate ca posibil petrolifere (cazul stratului reprezentat prin punctul 7) iar stratele corespunzătoare punctelor situate sub dreapta S_w=50% vor fi caracterizate ca petrolifere.

Graficul timp de propagare Δt și de rezistivitate $\rho_r(\rho_{x0})$ are mai multe avantaje. După el se poate caracteriza atît saturația nisipurilor curate cît și a celor argiloase. Efectul argilei de reducere a rezistivității este, mai mult sau mai puțin, compensat de faptul că ea face să crească timpul de propagare a semnalelor acustice pe măsură ce procentul argilei crește pentru o gamă acceptabilă a saturației S_w. Linia ρ_0 se poate construi ușor dacă în dreptul unui strat se cunoaște ρ_w și atunci pentru restul stratelor se poate determina S_w.

Determinarea saturației stratelor cînd s-a forat cu noroiul sărat. Pentru investigarea găurilor de sondă săpate cu noroi sărat se utilizează dispozitive focalizate, cu care se măsoară ρ_{LL} sau ρ_{MLL}.

Dacă rezistivitatea filtratului ρ_f este întrucîtva diferită de rezistivitatea apei de zăcămînt ρ_w, se poate obține raportul ρ_f/ρ_w. În acest caz se utilizează relația:

$$S_w = \frac{\rho_{MLL} \cdot \rho_w}{\rho_{LL} \cdot \rho_r} \qquad \text{(XVI.32)}$$

Problema se simplifică cînd $\rho_f = \rho_w$. În acest caz, relația XVI.32 devine:

$$S_w = \frac{\rho_{MLL}}{\rho_{LL}} \qquad \text{(XVI.33)}$$

Determinarea saturației stratelor cînd s-a forat cu aer sau gaze. În acest scop se înregistrează curbele neutron-neutron și gama-gama. Pe curba *nn* se determină saturația în lichide S_{Lichid} (apă + hidrocarburi) cu ajutorul relației:

$$\varnothing_n = \varnothing \cdot S_{lichid} \qquad \text{(XVI.34)}$$

în care $\varnothing_n$ este porozitatea determinată pe curba *nn*;
$\varnothing$ — porozitatea totală

$$S_{lichid} = S_w + S_H \qquad \text{(XVI.35)}$$

Dacă se neglijează densitatea gazelor, atunci densitatea fluidelor δ_f ce saturează porii rocilor este dată de relația

$$\delta_f = \frac{\varnothing_n}{\varnothing} \qquad \text{(XVI.36)}$$

Pe curba gama-gama se determină porozitatea totală cu ajutorul relației

$$\varnothing = \frac{\delta_m - \delta_g}{\delta_m - \delta_f} \qquad \text{(XVI.37)}$$

în care δ_m este densitatea matricei; δ_g — densitatea globală; δ_f — densitatea fluidului.

Înlocuind în relația 37 pe δ_f din relația 36 se obține:

$$\varnothing = \frac{\delta_m - \delta_g + \varnothing_n}{\delta_m} \qquad \text{(XVI.38)}$$

Înlocuind în relația 38 pe ø din relația 34 se obține

$$S_{lichid} = \frac{\varnothing_n \cdot \delta_m}{\delta_m - \delta_g + \varnothing_n} \qquad \text{(XVI.39)}$$

În cazul cînd δ_w este cunoscut, saturația S_w se calculează utilizînd una din relațiile XVI.31. Cunoscînd astfel pe S_w și S_{lichid} se poate deduce S_H, conform relației

$$S_H = S_{lichid} - S_w \qquad \text{(XVI.40)}$$

În fig. XVI.18 se prezintă o abacă construită de C. G. Rodermund și alții, pentru determinarea saturației în gaze a formațiunilor cînd se cunosc: densitatea matricei δ_m, densitatea globală δ_g și porozitatea măsurată pe curbele neutronice $\varnothing_N$.

Abaca nu se utilizează decît pentru formațiunile curate. Abaca din fig. XVI.18 se folosește pentru determinarea saturației în gaze și a porozității formațiunilor cînd acestea nu conțin petrol, sau la determinarea saturației în petrol și a porozității formațiunilor petrolifere cînd acestea nu conțin gaze.

Utilizara abacei. La partea inferioară a abacei, pe ordonată, se înscrie densitatea matricei δ_m și din punctul respectiv se trasează orizontala pînă întîlnește dreapta paralelă cu liniile înclinate trasate din punctul de pe abscisă, care marchează densitatea globală δ_g. În continuare, se ridică verticala pînă intersectează orizontala trasată din punctul de pe ordonată care reprezintă porozitatea măsurată pe curba *nn*.

Pentru citirea saturației în gaze a formațiunilor studiate se trasează prin punctul obținut ca mai sus o dreaptă, mai mult sau mai puțin paralelă cu dreptele neparalele ale abacei, pînă la scala gradată S_g. În cazul prezentat în fig. XVI.18, saturația în gaze se obține prin interpolare și este egală cu 22%. Pentru citirea porozității reale a formațiunii studiate ø, se trasează prin același punct de intersecție o dreaptă

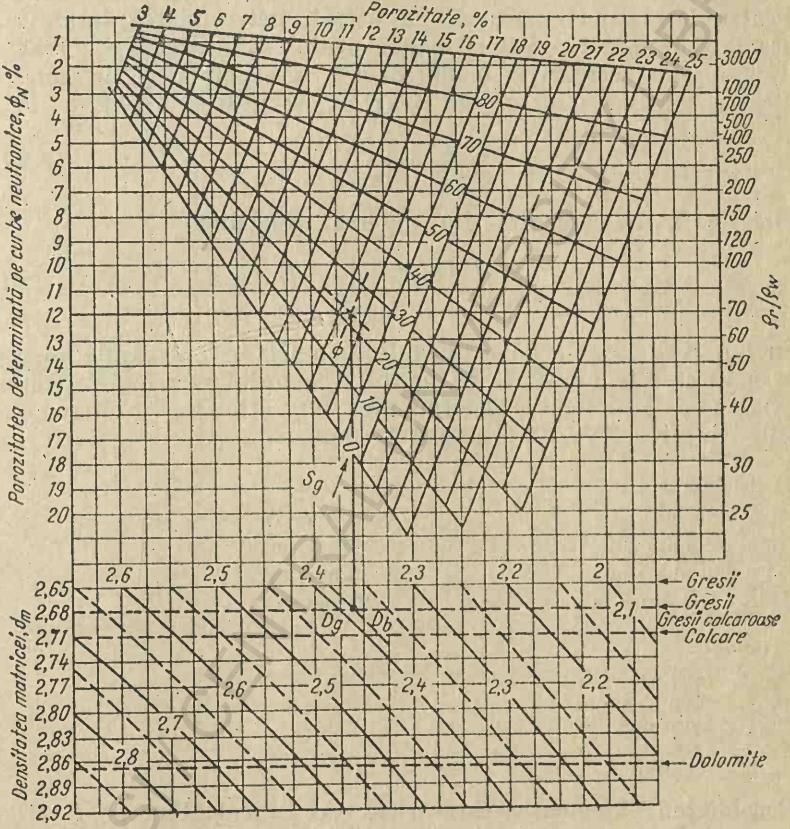


Fig. XVI.18. Abacă pentru determinarea saturației în gaze a rocilor [13].

paralelă cu dreptele paralele ale abacei și pe scala gradată de la partea superioară se citește porozitatea reală. În cazul prezentat, porozitatea reală ø se obține prin interpolare și este egală cu 15,5%.

2.2. Determinarea saturației formațiunilor curate umectate cu petrol

Pînă în prezent nu s-au întîlnit formațiuni saturate 100% cu petrol și nici umectate 100% cu apă. În cazul formațiunilor umectate cu petrol, spre deosebire de cele umectate cu apă, valoarea exponentului saturației n crește, putînd avea valori cuprinse între 2 și 10 (v. relația XVI.31).

Pentru formațiuni umectate cu petrol, determinarea saturației se reduce la determinarea valorii exponentului saturației n și aceasta se realizează prin încercări în modul descris în exemplul ce urmează.

Pentru calcularea lui n prin încercări, se utilizează relația

$$\frac{\rho_{zi}}{\rho_{xo}} = \left(\frac{S_{xo}}{S_{zi}}\right)^n \qquad \text{(XVI.41)}$$

Relația XVI.41 rezultă din raportul relațiilor

$$S_{xo} = \sqrt[n]{\frac{F\rho_f}{\rho_{xo}}} \text{ și } S_{zi} = \sqrt[n]{\frac{F\rho_f}{F\rho_{zi}}} \qquad \text{(XVI.42)}$$

În fig. XVI.19 se redă o diagrafie complexă, înregistrată în roci a căror matrice este umectată cu petrol. Exemplul se referă la un nisip din Oklahoma [3]. Pentru determinarea saturației S_w se citesc pe diagrafiile din fig. XVI.19 următoarele date:

Valori citite pe diagrafii	Valori reale
$Ps = -55$ mV	-85 mV
$16'' = 145$ ohm · m	355 ohm · m
$64'' = 420$ ohm · m	420 ohm · m
$19' = 1\,500$ ohm · m	1 260 ohm · m

Alte date:

$\rho_n = 0{,}84$ ohm · m
$\rho_f = 0{,}60$ ohm · m
$\rho_{tn} = 1{,}15$ ohm · m
$\rho_{xo} = 13{,}8$ ohm · m
$\rho_w = 0{,}056$ ohm · m.

Considerînd exponentul saturației $n=2$ și calculînd pe F și ø la diverse valori ale saturației în hidrocarburi reziduale *din zona spălată*, utilizînd relația XVI.42, se obține:

pentru o saturație în hidrocarburi reziduale S_{Hr} de 0% se găsește: $F=23$ Ø și $=18{,}5\%$ ($\varnothing$ dedus din relația $F = \frac{0.62}{\varnothing^{2,15}}$);

— pentru o saturație în hidrocarburi reziduale de 30% se găsește $F=11{,}5$ și $\varnothing = 26{,}3\%$.

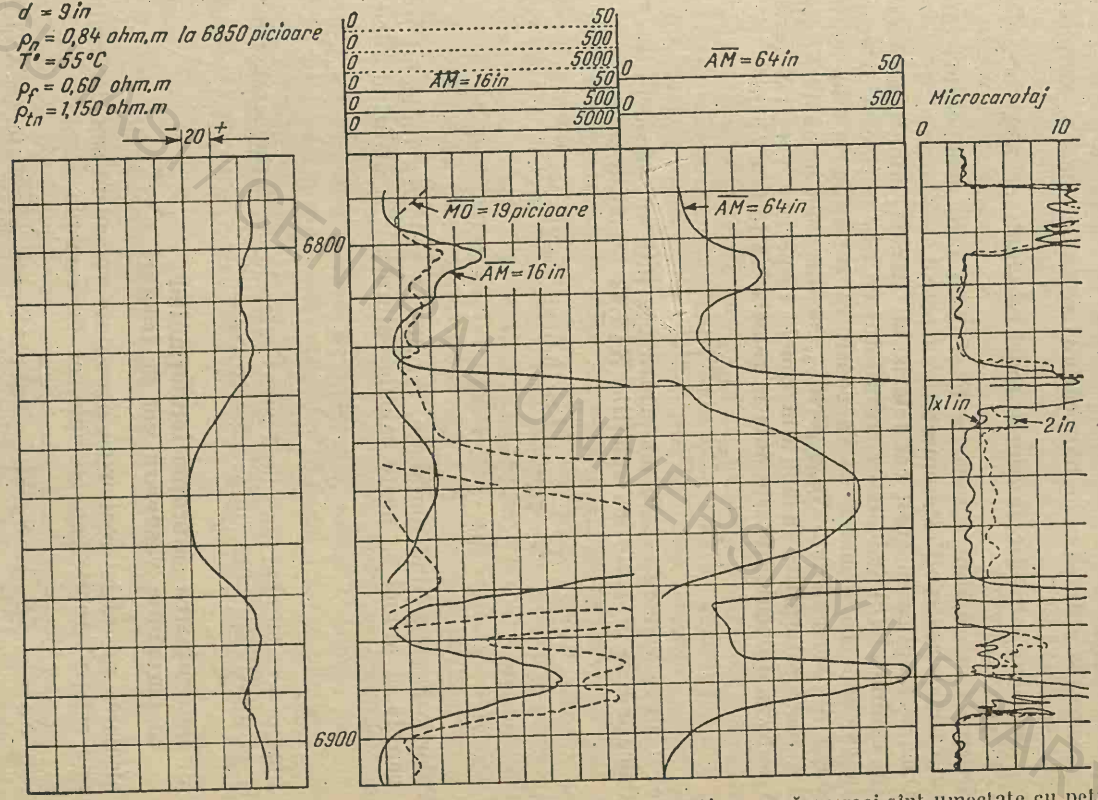


Fig. XVI.19. Exemplu de diagrafie complexă înregistrată într-o formațiune a căror roci sînt umectate cu petrol [3].

Considerînd pe $n=2$ şi calculînd pe F şi $\varnothing$ la diverse valori ale saturaţiei în hidrocarburi reziduale *din zona invadată*, utilizînd relaţia XVI.42 se obţine:

— pentru o saturaţie în hidrocarburi reziduale de 0% se găseşte: $F=592$ şi $\varnothing=4{,}2\%$;

— pentru o saturaţie în hidrocarburi reziduale de 30% se găseşte: $F=290$ şi $\varnothing=5{,}7\%$.

Diferenţa mare dintre valorile F şi $\varnothing$ în cele două cazuri indică faptul că matricea rocii este umectată cu petrol.

Dacă s-ar aplica în acest caz relaţia lui Archie luînd pentru exponentul saturaţiei (n) valoarea 2, rezultatul ce s-ar obţine ar fi eronat.

În calculele ce urmează se va considera saturaţia în hidrocarburi reziduale din zona spălată $S_{Hr(x0)}=10\%$, iar din zona invadată $S_{H(zi)}=70\%$. deci saturaţiile în apă din zonele respective vor fi $S_{x_0}=90\%$ şi $S_{zi}=30\%$. Înlocuind aceste date în relaţia XVI.41 se obţine:

$$\frac{335}{13{,}8}=\left(\frac{90}{30}\right)^n;$$

astfel n are o valoare $=2{,}9$, iar pentru uşurinţa va considera $n=3$.

Calculînd pe F şi $\varnothing$ cu relaţiile XVI.42 se obţine:

$$S_{x_0}=\sqrt[3]{\frac{F\rho_f}{\rho_{xo}}}\ ;\ F=16{,}6 \text{ şi } \varnothing=21{,}5\%$$

$$S_{zi}=\sqrt[3]{\frac{F\rho_f}{\rho_{zi}}};\ F=16{,}0 \text{ şi } \varnothing=22{,}0\%$$

Valorile F şi $\varnothing$ fiind apropiate, rezultă că valoarea indicelui $n\approx 3$ este corectă şi atunci se poate calcula saturaţia S_w utilizînd relaţia:

$$S_w=\sqrt[3]{\frac{F\cdot\rho_w}{\rho_r}} \qquad \text{(XVI.43)}$$

Luînd $\rho=1\,260$ ohm · m (după curba laterală de 19 picioare), pentru $F=17$ şi $\rho_w=0{,}056$ ohm · m se găseşte $S_w=9\%$.

2.3. Determinarea saturaţiei formaţiunilor cu porozitate vacuolară sau de fracturi

Calcularea saturaţiei rocilor cu porozitate vacuolară sau de fracturi utilizînd relaţii Archile sau Humble, ca de exemplu

$$S_w=\sqrt{\frac{\rho_w}{\varnothing^m\rho_r}};\quad S_w=\sqrt{\frac{\rho_w}{\varnothing^{2,12}\rho_r}};\quad S_w=\sqrt{\frac{0{,}62\,\rho_w}{\varnothing^{2,15}\rho_r}} \text{ etc.} \qquad \text{(XVI.44)}$$

ar conduce la obţinerea de valori eronate.

Pînă în prezent nu s-a stabilit o metodologie unică pentru determinarea saturației rocilor cu porozitate vacuolară sau de fracturi. Totuși există o serie de relații cu care se poate determina cu mai multă acurateță porozitatea vacuolară sau de fracturare a formațiunilor decît cu relații Archile sau Humble.

Criteriile pentru recunoașterea pe diagrafii a rocilor cu porozitate vacuolară sau fracturală sînt:

— Pe diagrafia potențialului spontan apor vîrfuri de sens pozitiv, la distanțe neregulate între ele. In cuprinsul unui strat, vîrfurile sînt rotunjite și nu ascuțite, ca în cazul intercalațiilor marnoase.

— Pe diagrafiile înregistrate cu dispozitive potențiale avînd lungimi diferite, valorile de rezistivitate aparentă sînt apropiate; de exemplu, rezistivitățile aparente măsurate pe diagrafiile înregistrate cu dispozitiv potențial avînd lungimea AM=0,4 m (16 in) sînt apropiate ca valoare de rezistivitățile aparente înregistrate cu dispozitiv potențial avînd lungimea AM=1,6 m (64 in) (v. fig. XVI.20). De regulă, valorile de rezistivitate aparentă au valori reduse în dreptul vacuolelor sau fracturilor, deoarece în fond se măsoară rezistivitatea filtratului sau a noroiului de foraj care a pătruns adînc în vacuole sau în fracturi.

— Pe diagrafiile înregistrate cu dispozitiv de microcarotaj sau cu dispozitiv microlaterolog apar intervale a căror rezistivitate este scăzută și acestor intervale le corespund vîrfurile de sens pozitiv de pe diagrafia PS și intervalele cu valori reduse de rezistivitate aparentă de pe diagrafiile înregistrate cu dispozitive potențiale avînd lungimi diferite.

— Pe diagrafiile sonice de timp (Δt) apar cicluri neînregistrate (v. § XII.1.3.4), care corespund cu vîrfurile de sens pozitiv de pe diagrafia PS și cu intervalele cu rezistivitate scăzută de pe curbele de microcarotaj sau microlaterolog.

— În cazul parametrilor semnalului acustic, pe diagrafia amplitudinii undelor transversale se observă o slabă atenuare, iar pe diagrafia perioadei primei sosiri negative a undei longitudinale se observă variații bruște (v. § XII.2.3 și tabelul 13).

— Porozitatea determinată după diagrafii gama-gama ($\varnothing_{\gamma\gamma}$) este superioară porozității determinată după diagrafii sonice ($\varnothing_s$) respectiv:

$$\varnothing_{vac}=\varnothing_{\gamma\gamma}-\varnothing_s; \qquad \text{(XVI.45)}$$

— Pe microseismograme apar figuri în formă de w (v. § XII.4).

În fig. XVI.20 se prezintă o diagrafie complexă schematizată, prin care se evidențiază aspectul următoarelor diagrafii în dreptul unei formațiuni cu porozitate vacuolară sau de fracturare: potențialul spontan (PS), două curbe de rezistivitate aparentă înregistrate cu dispozitive potențiale avînd lungimile AM=0,4 m și AM=1,6 m; curba de timp Δt și curba variației perioadei primei sosiri negative a undei longitudine.

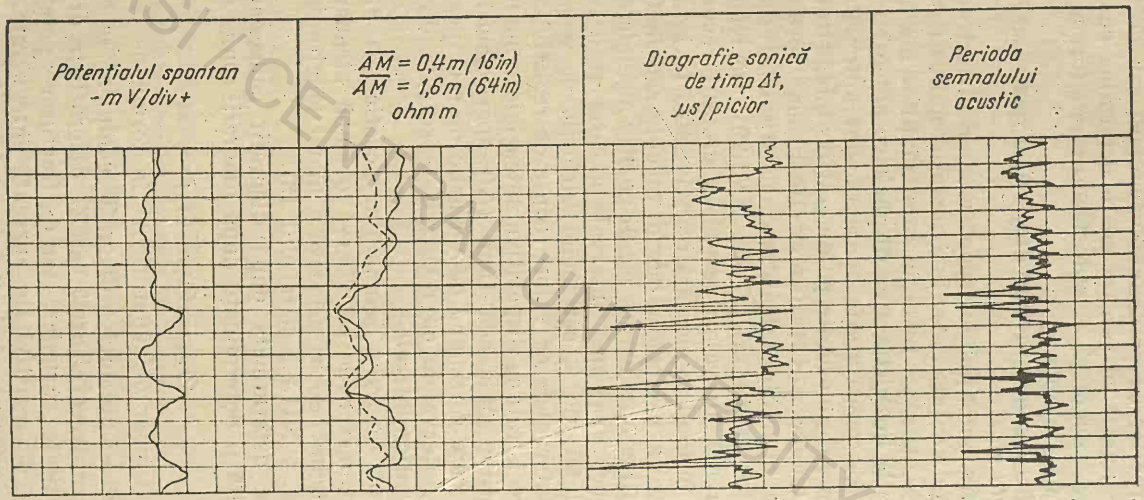


Fig. XVI.20. Diagrafie complexă prin care se evidențiază aspectul unor diagrafii înregistrate în dreptul unei formațiuni cu porozitate vacuolară sau de fracturi (diagrafiile sînt schematizate).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Se deosebesc două categorii de formaţiuni cu porozitate vacuolară: formaţiuni la care vacuolele comunică între ele; formaţiuni la care vacuolele nu corespund între ele.

Criteriile pentru diferenţierea celor două genuri de porozităţi vacuolare sînt arătate în continuare.

Formaţiuni la care vacuolele comunică între ele. În acest caz, porozitatea vacuolară şi porozitatea matricei rocii sînt considerate ca rezistenţe montate în paralel şi în consecinţă şi conductivitatea datorată vacuolelor va fi în paralel cu conductivitatea datorită porozităţii matricei. Acest tip de formaţiuni se recunosc pe diverse diagrafii prin existenţa unei zone de invadare adîncă şi ca urmare rezistivităţile măsurate cu microdispozitive (microcarotaj microlaterolog) vor avea valori apropiate de rezistivităţile aparente măsurate cu dispozitive avînd lungimi reduse (dispozitiv normal scurt avînd lungimea AM=0,4 m, proximitilog şi laterolog 8).

Formaţiuni la care vacuolele nu comunică între ele. În acest caz, porozitatea vacuolară şi porozitatea matricei rocii sînt considerate ca rezistenţe montate în serie şi ca urmare şi conductivitatea datorată vacuolelor va fi în serie cu conductivitatea datorită porozităţii matricei. Caracteristic pentru formaţiunile la care vacuolele nu comunică între ele este diametrul redus al zonei de invadare. Ca urmare, rezistivităţile aparente măsurate cu microdispozitive (microcarotaj, microlaterolog) vor fi diferite de rezistivităţile aparente măsurate cu dispozitive avînd lungimi reduse (normal scurt, PML, LL8).

Definirea porozităţii vacuolare. În cuprinsul unei roci cu porozitate vacuolară deosebim: — porozitatea matricei rocii $\varnothing_m$ şi — porozitatea vacuolară $\varnothing_{vac}$.

În fig. XVI.21 se prezintă schematizat repartiţia porozităţii matricei şi a porozităţii vacuolare într-un eşantion de rocă de forma unui cub avînd latura egală cu unitatea.

Porozitatea matricei $\varnothing_{vm}$ se determină cu relaţia

$$\varnothing_m = \frac{\varnothing_{vm}}{1-\varnothing_{vac}} \qquad \text{(XVI.46)}$$

în care $\varnothing_{vm}$ reprezintă vidul din matrice.

Porozitatea totală $\varnothing_t$ se determină cu relaţia:

$$\varnothing_t = \varnothing_{vac} + (1-\varnothing_{vac})\,\varnothing_m \qquad \text{(XVI.47)}$$

Porozitatea vacuolară $\varnothing_{vac}$ se deduce din relaţia XVI.47:

$$\varnothing_{vac} = \frac{\varnothing_t - \varnothing_m}{1-\varnothing_m} \qquad \text{(XVI.48)}$$

În calculele pentru determinarea saturației și porozității formațiunilor cu porozitate vacuolară sau de fracturi se va folosi parametrul „v", care se definește ca fiind raportul dintre porozitatea vacuolară și porozitatea totală:

$$v = \frac{o_{vac}}{o_t} \qquad \text{(XVI.49)}$$

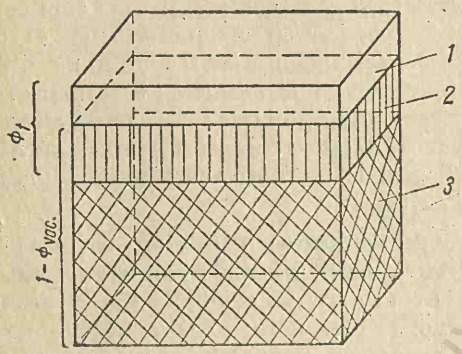


Fig. XVI.21. Reprezentare schematizată a distribuției porozității vacuolare și a porozității matricei într-un eșantion de rocă.
1 — porozitatea vacuolară $\varnothing_{vac}$; *2* — porozitatea matricei sau vidul din matricea rocii $\varnothing_m$; *3* — matricea rocii; $\varnothing_t$ — porozitatea totală: $\varnothing_m + \varnothing_{vac}$.

Înlocuind în relația XVI.49 pe $\varnothing_{vac}$ cu $\varnothing_{vac}$ din relația XVI.48 se obține:

$$v = \frac{o_t - o_m}{(1 - o_m) o_t} \qquad \text{(XVI.50)}$$

2.3.1. *Determinarea saturației formațiunilor la care vacuolele comunică între ele.*

În cazul formațiunilor la care vacuolele comunică între ele, s-a arătat că porozitatea vacuolară $\varnothing_{vac}$ se consideră conectată în paralel cu porozitatea matricei $\varnothing_m$, deci rezistivitatea rezultantă se va determina cu o relație de forma:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}$$

în care ρ este rezistivitatea rezultantă (rezistivitatea globală);
ρ_1 — rezistivitatea porțiunii din rocă cu vacuole;
ρ_2 — rezistivitatea matricei poroase.

Pentru determinarea saturației formațiunilor cu porozitate vacuolară se vor deosebi două cazuri: a) interval saturat 100% cu apă de zăcământ; b) interval petrolifer (amîndouă intervalele se cuprind în aceeași formațiune).

Interval saturat 100 % cu apă de zăcămînt. În zona invadată, vacuolele sînt saturate 100% cu filtrat, deci $S_w=1$. Rezistivitatea matricei poroase din zona invadată se consideră neschimbată, deoarece filtratul care înconjoară roca poroasă nu permite fluidului inițial conținut să fie dislocuit. În zona necontaminată vacuolele sînt saturate 100% cu apă de zăcămînt, deci $S_w=1$. Rezistivitatea matricei poroase din zona necontaminată are aceeași valoare cu rezistivitatea matricei poroase din zona invadată.

Relațiile matematice cu care se determină rezistivitățile formațiunii saturată 100% cu apă de zăcămînt din zona invadată și din zona necontaminată sînt:

$$\frac{1}{\rho_{0i}}=\frac{v\sigma_i}{\rho_f}+\frac{1-v\sigma_i}{\rho_{0r}} \qquad \text{(XVI.52)}$$

$$\frac{1}{\rho_{0n}}=\frac{v\sigma_i}{\rho_w}+\frac{1-v\sigma_i}{\rho_{0r}} \qquad \text{(XVI.53)}$$

în care: ρ_{0i} este rezistivitatea globală a formațiunii saturată 100% cu apă de zăcămînt din zona invadată;

ρ_{0n} — rezistivitatea globală a formațiunii saturată 100% cu apă de zăcămînt din zona necontaminată;

v — un parametru $=\frac{\sigma_{vac}}{\sigma_i}$;

ρ_f — rezistivitatea filtratului;

σ_i — porozitatea totală (vidul total);

ρ_{0r} — rezistivitatea reală a matricei poroase saturată 100% cu apă de zăcămînt.

Rezistivitatea globală a formațiunii saturată 100% cu apă de zăcămînt din zona invadată ρ_{0i} se determină după diagrafii înregistrate cu dispozitive avînd rază de investigare redusă, de exemplu cu dispozitiv potențial avînd lungimea $AM=0{,}4$ (16 in), proximitilog etc.

Rezistivitatea globală a formațiunii saturată 100% cu apă de zăcămînt din zona necontaminată ρ_{0n} se determină după diagrafii înregistrate cu dispozitive avînd raza de înregistrare mare (de exemplu inductiv, laterolog etc).

Porozitatea totală σ_i se determină după diagrafii neutronice sau gama-gama compensate.

Rezistivitatea filtratului ρ_f se determină obișnuit în laborator și se corectează la temperatura stratului studiat, sau prin alt procedeu.

Rezistivitatea apei de zăcămînt nu se determină după profilele potențialului spontan, deoarece cantitatea mare de filtrat sau noroi de foraj care a invadat vacuolele denaturează profilul *PS*. (În dreptul vacuolelor pe profilul *PS* s-ar putea determina rezistivitatea filtratului sau a noroiului de foraj și nu rezistivitatea apei de zăcămînt). În consecință,

rezistivitatea apei de zăcămînt ρ_w se determină prin analiza chimică, utilizînd abaca din din I.1 sau prin alt procedeu.

Din ecuațiile XVI.52 și XVI.53 se determină valorile necunoscutelor ρ_{0r} (rezistivitatea reală a matricei poroase saturată 100% cu apă de zăcămînt) și v (parametru).

Interval petrolifer. În zona invadată, ca și în cazul intervalului saturat 100% cu apă de zăcămînt, vacuolele sînt saturate 100% cu filtrat, deci $S_w=1$. Rezistivitatea rocii poroase din zona invadată rămîne neschimbată, deoarece filtratul care înconjoară matricea poroasă nu permite fluidului conținut inițial să fie dislocuit. În zona necontaminată vacuolele sînt saturate numai parțial cu apă de zăcămînt, restul spațiului fiind ocupat de petrol. Rezistivitatea matricei poroase din zona necontaminată are aceeași valoare cu rezistivitatea matricei poroase din zona invadată.

Relațiile matematice cu care se determină rezistivitățile formațiunii petrolifere din zona invadată și necontaminată sînt:

$$\frac{1}{\rho_{Hi}} = \frac{v\varnothing_t}{\rho_f} + \frac{1-v\varnothing_t}{\rho_{Hr}} \qquad \text{(XVI.54)}$$

$$\frac{1}{\rho_{Hn}} = \frac{v\varnothing_t}{\rho_w} S_{wv} + \frac{1-v\varnothing_t}{\rho_{Hr}} \qquad \text{(XVI.55)}$$

în care: ρ_{Hi} este rezistivitatea globală a formațiunii petrolifere din zona invadată;

ρ_{Hn} — rezistivitatea globală a formațiunii petrolifere din zona necontaminată;

ρ_{Hr} — rezistivitatea reală a matricei poroase care conține x% petrol;

S_{wv} — saturația în apă de zăcămînt a vacuolelor din zona necontaminată.

Restul notațiilor v, $\varnothing_t$, ρ_f și ρ_w au aceleași semnificații ca în relațiile XVI.52 și XVI.53.

Rezistivitatea globală a formațiunii petrolifere din zona invadată ρ_{Hi} se determină după aceleași diagrafii ca și ρ_{0i}, iar rezistivitatea globală a formațiunii petrolifere din zona necontaminată ρ_{Hn} se determină după aceleași diagrafii ca și ρ_{0n}.

Din ecuațiile XVI.54 și XVI.55 se determină valorile necunoscutelor: S_{wv} (saturația în apă de zăcămînt a vacuolelor din zona necontaminată) și ρ_{Hr} (rezistivitatea reală a matricei poroase care conține x% petrol).

Saturația în apă a matricei poroase din zona necontaminată S_{wn} se determină utilizînd relația lui Archie:

$$S_{wn}=\sqrt[n]{\frac{\rho_{or}}{\rho_{Hr}}}=\sqrt[n]{\frac{\rho_w}{\varnothing^m\rho_{Hr}}} \qquad \text{(XVI.56)}$$

în care $\varnothing^m$ se obține din relația

$$\varnothing^m=\frac{(1-v)\,\rho_t}{(1-v)\,\rho_t} \qquad \text{(XVI.57)}$$

2.3.2. *Determinarea saturației formațiunilor la care vacuolele nu comunică între ele*

Pentru formațiunile la care vacuolele nu comunică între ele s-a arătat că porozitatea vacuolară se consideră ca rezistențe montate în serie cu porozitatea matricei, deci rezistivitatea rezultantă se va determina după o relație de forma:

$$\rho=\rho_1+\rho_2,$$

în care: ρ este rezistivitatea rezultantă (globală),
ρ_1 — rezistivitatea porțiunii din rocă cu vacuole;
ρ_2 — rezistivitatea matricei poroase.

Relațiile matematice cu care se determină rezistivitatea formațiunii saturată 100% cu apă de zăcămînt din zona invadată și din zona necontaminată sînt:

$$\rho_{0t}=v\varnothing_t\rho_f+(1-v\varnothing_t)\rho_{or} \qquad \text{(XVI.58)}$$

$$\rho_{0n}=v\varnothing_t\rho_w+(1-v\varnothing_t)\rho_{or} \qquad \text{(XVI.59)}$$

Notațiile sînt aceleași cu cele utilizate în relațiile precedente.

Relațiile matematice cu care se determină rezistivitățile formațiunii petrolifere din zona invadată și din zona necontaminată sînt:

$$\rho_{Hi}=v\varnothing_t\rho_f+(1-v\varnothing_t)\rho_{Hr} \qquad \text{(XV.60)}$$

$$\rho_{Hn}=v\varnothing_tS_{wv}+(1-v\varnothing_t)\rho_{Hr} \qquad \text{(XVI.61)}$$

Din ecuațiile XVI.58 și XVI.59 se determină v și ρ_{or}, iar din ecuațiile XVI.60 și XVI.61 se determină S_{wv} și ρ_{Hr}.

Saturația în apă a matricei poroase din zona necontaminată S_{wn} a rocilor cu porozitate vacuolară la care vacuolele nu comunică între ele se determină cu aceeași relație cu care se determină și saturația în apă a matricei poroase din zona necontaminată a rocilor la care vacuolele comunică între ele:

$$S_{wn}=\sqrt[n]{\frac{\rho_{or}}{\rho_{Hr}}}$$

Exemplu de determinare a saturației în apă de zăcământ a vacuolelor din zona necontaminată S_{wv} și a saturației în apă de zăcământ a matricei poroase din zona necontaminată S_{wn} în cazul formațiunilor la care vacuolele comunică între ele. Date: $\rho_f = 0{,}8$ ohm · m; $\rho_w = 0{,}2$ ohm · m; $o_t = 30\%$; $\rho_{oi} = 6$ ohm · m; $\rho_{on} = 2$ ohm · m; $\rho_{Hi} = 8$ ohm · m; $\rho_{Hn} = 10$ ohm · m;

Ecuațiile utilizate în cazul formațiunii saturată 100% cu apă de zăcământ sînt:

$$\frac{1}{6} = \frac{0{,}3\,v}{0{,}8} + \frac{1-0{,}3\,v}{\rho_{or}}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{0{,}3\,v}{0{,}2} + \frac{1-0{,}3\,v}{\rho_{or}}$$

Rezolvînd ecuațiile de mai sus se obține:

$\rho_{or} \approx 15{,}8$ ohm · m, rotunjit $= 16$ ohm · m; $v \approx 0{,}3$.

Ecuațiile utilizate în cazul unei formații petrolifere sînt:

$$\frac{1}{8} = \frac{0{,}3 \times 0{,}3}{0{,}8} + \frac{1-0{,}3 \times 0{,}3}{\rho_{Hr}}$$

$$\frac{1}{10} = \frac{0{,}3 \times 0{,}3}{0{,}2} S_{wv} + \frac{1-0{,}3 \times 0{,}3}{\rho_{Hr}}$$

Rezolvînd ecuațiile de mai sus se obține:

$$S_{wv} \approx 19\%; \quad \rho_{Hr} \approx 70 \text{ ohm} \cdot \text{m}.$$

Pentru determinarea saturației în apă a matricei poroase din zona necontaminată se utilizează relația (XVI.56):

$$S_{wn} = \sqrt{\frac{\rho_{or}}{\rho_{Hr}}} = \sqrt{\frac{16}{70}} \approx 53\%$$

Interpretarea rezultatelor. Într-un metru cub din formațiunea cu porozitate vacuolară sau de fracturi, distribuția fluidelor este după cum urmează:

Porozitatea totală a rocii este de 30%, deci dintr-un m^3 de rocă volumul ocupat de fluide (apă + petrol) este 0,3 m^3.

Din acest volum, vacuolele reprezintă un volum egal cu $0{,}3 \times 0{,}3 = 0{,}09$ m^3, iar porii matricei rocii reprezintă un volum egal cu $0{,}30 - 0{,}09 = 0{,}21$ m^3.

Volumul ocupat de apă în vacuole este $\frac{0{,}09 \times 19}{100} \approx 0{,}02$ m^3.

Volumul ocupat de petrol în vacuole este: $0{,}09 - 0{,}02 = 0{,}07$ m^3.

Volumul ocupat de apă în porii matricei este $\frac{0{,}21 \times 53}{100} = 0{,}11$ m^3.

Volumul ocupat de petrol în porii matricei este $0{,}21 - 0{,}11 = 0{,}10$ m^3.

Față de rezultatele de mai sus, se apreciază că la încercarea intervalului analizat se va obține (posibil) apă cu petrol.

Concluzii. Determinarea saturației rocilor cu porozitate obișnuită intergranulară sau cu microfisuri (roci a căror matrice este umectată cu apă și parțial cu petrol) după diagrafiile electrice, nucleare și sonice,

dă rezultate satisfăcătoare. Pentru restul cazurilor, determinarea saturației este dificilă, iar rezultatele pot fi considerate doar orientative.

Date suplimentare despre determinarea saturației rocilor se găsesc în publicațiile de specialitate [10,11, 12, 13].

3. PERMEABILITATEA

Măsurarea directă a valorilor de permeabilitate după diagrafii nu s-a putut face pînă în prezent. După unele diagrafii se poate aprecia totuși dacă un strat este permeabil sau nu. Cele mai concludente diagrafii sînt potențialul spontan sau microcarotajul; urmează cavernograma, diagrafiile de rezistivitate aparentă și diagrafiile neutronice.

Pe profilul PS, în mod obișnuit stratele permeabile sînt evidențiate prin anomalii de sens negativ, ca urmare a activității apelor de zăcămînt și a activității fluidului de foraj.

Pe profilele de microcarotaj, rocile permeabile se disting prin separații pozitive, rareori prin separații negative.

Pe cavernograme, rocile permeabile se localizează de obicei în dreptul zonelor în care diametrul găurii măsurat este mai mic decît cel nominal (al sapei). Micșorarea diametrului se explică prin formarea turtei de noroi depusă pe peretele găurii sondei, ca urmare a filtrării apei din noroi în stratul permeabil.

Pe diagrafiile de rezistivitate aparentă, stratele permeabile se disting cînd prin compararea curbelor de ρ_A înregistrate cu dispozitive de lungimi diferite, se evidențiază existența unei zone invadate. (Numai în strate permeabile se creează zonă de invadare).

Pe diagrafiile neutronice, zonele permeabile obișnuit nu pot fi separate cu certitudine; totuși, rocile cu porozități cuprinse între 5 și 25% pot fi socotite permeabile.

Un mijloc eficient pentru determinarea zonelor permeabile poroase saturate cu fluide este încercarea acestora cu stratotesterul (alegerea punctelor de încercare se face după diagrafia geofizică).

Interpretarea cantitativă ridică și problema determinării valorii permeabilității. Pentru evaluarea cantitativă a permeabilității au fost propuse diferite formule și grafice.

Kozeni și Jacquin au descris relația între porozitatea ø și permeabilitatea k, prin următoarea formulă:

$$k=\alpha \varnothing^{2m}+1 \qquad \text{(XVI.62)}$$

în care α este un coeficient, care pentru gresia de Fontainebleau este de $2 \cdot 16^6$; m — factorul de cimentare a cărui valoare este 1,75 pentru aceeași gresie.

Schlumberger, plecînd de la relaţia empirică a lui Archie, a stabilit relaţia:

$$k^{1/2}=250\frac{\varnothing^3}{S_{wi}} \qquad \text{(XVI.63)}$$

în care S_{wi} este saturaţia în apă ireductibilă.

Tixier a remarcat în gresii cu permeabilitate redusă un gradient constant de rezistivitate, care se poate întîlni în zona de tranziţie apă-petrol sau apă gaz. Rezistivitatea în această zonă se poate exprima prin relaţia:

$$\rho_i=\frac{\Delta\rho}{\Delta h}\cdot h+\rho_0 \qquad \text{(XVI.64)}$$

în care $\frac{\Delta\rho}{\Delta h}$ este gradientul de rezistivitate aparentă; h — distanţa de deasupra zonei acvifere; ρ_0 — rezistivitatea zonei acvifere saturată 100% cu apă de zăcămînt.

Saturaţia S_w din această zonă se poate exprima în funcţie de gradientul de rezistivitate „a", a cărui valoare este dată de raportul

$$a=\frac{\Delta\rho}{\Delta h}\cdot\frac{1}{\rho_0} \qquad \text{(XVI.65)}$$

deci

$$S_w=\left(\frac{\rho_0}{\rho_r}\right)^{1/2}=\frac{1}{(1+ah)^{1/2}} \qquad \text{(XVI.66)}$$

Presiunea capilară P_c este o funcţiune de saturaţie şi permeabilitate, ceea ce se exprimă prin relaţia

$$P_c=f(S_w)\frac{1}{k^{1/2}} \qquad \text{(XVI.67)}$$

în care k este permeabilitatea.

Legătura dintre presiunea capilară P_c şi înălţimea h pînă la care se ridică apa deasupra limitei apă petrol este dată de relaţia

$$h=2{,}3\frac{P_c}{\delta_w-\delta_H} \qquad \text{(XVI.68)}$$

în care δ_w este densitatea apei, iar δ_H — densitatea petrolului.

Cînd saturaţia în apă este constantă, produsul ah este, de asemenea, constant şi are valoarea

$$ah=2{,}3\frac{aP_c}{\delta_w-\delta_H}=\text{constant} \qquad \text{(XVI.69)}$$

Din relaţile XVI.67 XVI.69, se obţine:

$$a \cdot \frac{2{,}3}{\delta_w - \delta_o} = ck^{1/2} \qquad \text{(XVI.70)}$$

în care c este o constantă.

Relaţia 70 se poate reprezenta grafic, într-un sistem de coordonate dublu logaritmice, pentru diferite valori ale densităţii apei (δ_w). Pe aceste grafice construite de Tixier se poate citi permeabilitatea (k).

Tabelul 17

Permeabilitatea unor roci

Formaţiunea	Permeabilitatea, mD
Formaţiuni aproape impermeabile (produc după fisurare).	1—5
Formaţiuni puţin permeabile	5—50
Formaţiuni permeabile	50—200
Formaţiuni foarte permeabile	200—5000

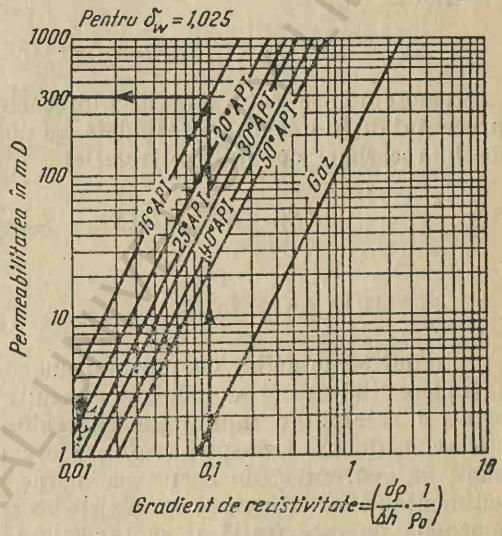


Fig. XVI.22. Permeabilitatea în funcţie de gradientul de rezistivitate [3].

În fig. XVI.22 este prezentat graficul pentru $\delta_w = 1{,}025$, al cărui mod de utilizare este descris în exemplul de mai jos, pentru următoarele date: $\Delta\rho/\Delta h = 1$ ohm · m/m, $\rho_0 = 10$ ohm · m, $\delta_H = 15°$ A.P.I.

Soluţia: $k = 300$ mD (milidarcy).

Permeabilitatea rocilor variază de la zero, la mii de milidarcy. În tabelul 17 se dă o clasificare a rocilor după permeabilitatea lor.

Date suplimentare despre permeabilitatea rocilor se pot găsi în publicaţiile de specialitate [14, 16].

4. SATURAŢIA ÎN HIDROCARBURI REZIDUALE

Hidrocarburile reziduale sînt hidrocarburile rămase în zona invadată şi în zona spălată după pătrunderea filtratului în formaţiunile permeabile şi poroase care conţin petrol sau gaze. Relaţia utilizată pentru deter-

minarea hidrocarburilor reziduale a fost stabilită de Archie:

$$S_{Hr}=1-S_{x_0}=1-\frac{1}{\varnothing}\sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_{x_0}}} \qquad \text{(XVI.71)}$$

După cum rezultă din relația 71, pentru determinarea saturației în hidrocarburi reziduale este necesar să se cunoască: $\varnothing$ — porozitatea; ρ_f — rezistivitatea filtratului și ρ_{x_0} — rezistivitatea zonei spălate.

Saturația în hidrocarburi a zonei necontaminate se determină cu relația:

$$S_H=1-S_w=1-\frac{1}{\varnothing}\sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_r}} \qquad \text{(XVI.72)}$$

Cunoscîndu-se saturația în hidrocarburi a zonei necontaminate și procentul de hidrocarburi reziduale, se poate calcula producția probabilă de hidrocarburi cu ajutorul relației

$$\varnothing(S_H-S_{Hr})=\varnothing(S_{x_0}-S_w)=\sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_{x_0}}}-\sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_r}} \qquad \text{(XVI.73)}$$

5. PRESIUNI ANORMALE

Studiul structurilor cu presiuni anormale au arătat că acestea au o extindere limitată și se întîlnesc obișnuit în bazine care au luat naștere printr-o precipitare rapidă sau în regiuni salifere. În amîndouă cazurile se întîlnesc orizonturi argiloase necompactate, care au un conținut mare de apă. Apa din asemenea marne suportă o parte din greutatea sedimentelor superioare și se găsește la o presiune anormală. Presiunea anormală nu este fosilă și ea se disipează în timp.

S-au făcut numeroase studii despre presiunile anormale, de exemplu în Nordul Saharei, în Golful Mexic, Luisiana, Bazinul Delaware (West-Texas) etc. [17] și întotdeauna au fost prezente și marne slab compactate.

În momentul depunerii, argilele reține o mare cantitate de apă pe care în timp o expulzează, expulzarea urmată de o creștere a densității și compactității lor. Acest fapt este bine evidențiat de diagrafiile de timp (Δt sonic), pe care se observă o creștere treptată a timpului de propagare a semnalelor acustice [19, 20].

Explicația că în argilele necompactate apa suportă o parte din greutatea sedimentelor superioare este următoarea: apa în exces menține particulele solide relativ depărtate și, datorită acestui fapt, sînt supuse la o presiune proporțională cu a sedimentelor superioare, depășind astfel presiunea geostatică. Excesul de presiune suportat de apa din argilele necompactate este transmis în toate direcțiile. Cînd argilele necompactate sînt situate deasupra sau dedesubtul unui orizont gazos,

apa conținută în porii acestui orizont de asemenea va avea o presiune mai mare decît presiunea hidrostatică normală, deoarece i s-a transmis presiunea excedentară a apei din argila necompactată (în lichidele conținute într-un vas închis în orice punct presiunea este aceeași).

Persistența argilelor în starea necompactată se explică prin imposibilitatea acestora de a elimina apa conținută în exces, din cauza rocilor din acoperiș și culcuș care nu primesc apa decît cu foarte mare greutate și în timp îndelungat. Astfel de cazuri se întîlnesc în formațiunile salifere, în care sarea are grosimi mari. Astfel, sedimentele salifere sînt indirect cauza persistenței argilelor necompactate deci a presiunilor mari din rocile permeabile și poroase vecine.

În fig. XVI.23 se prezintă o diagrafie sonică de timp Δt, schematizată din regiunea Hassi-Messaoud, din care rezultă că sînt două unități distincte:

— unitatea inferioară, constituită din gresii triasice și o serie de argile compacte (seria inferioară). Aceste argile nu curg și viteza de propagare a semnalelor acustice în cuprinsul lor este normală;

— unitatea superioară, care are în acoperiș sarea (masivă). În această unitate se găsesc argilele necompactate, care curg, și în cuprinsul cărora viteza de propagare a semnalelor acustice este anormală (timp mare de propagare).

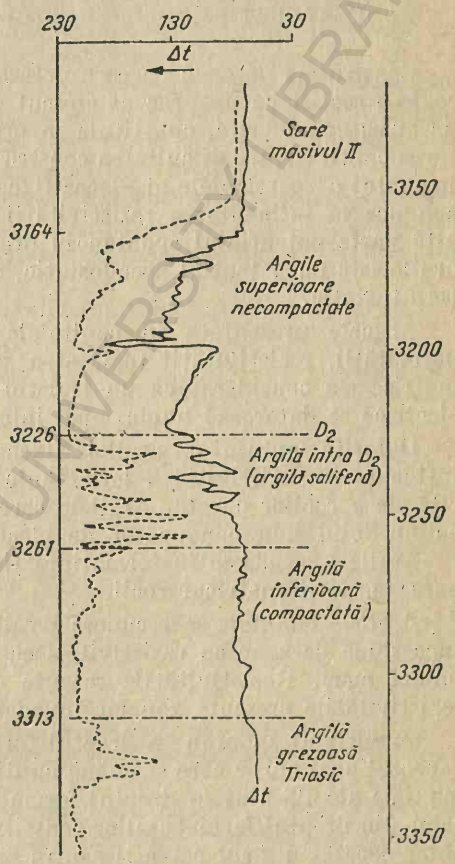


Fig. XVI.23. Argile necompactate intrasalifere. Exemplu de profil sonic Δt (schematizat) într-un foraj de regiunea Hassi-Messaoud (Nord Sahara) [20].

Existența argilelor necompactate din unitatea superioară explică presiunile anormale întîlnite în Triasicul inferior și în Carboniferul din regiunea Hassi-Messaoud (Nord Sahara) [20].

În țara noastră, presiuni anormal de mari s-au întîlnit în Sarmațianul inferior din Regiunea Berca.

6. DETERMINAREA POROZITĂȚII ȘI SATURAȚIEI ROCILOR ARGILOASE

Construirea de abace pentru determinarea porozității și rezistivității reale a rocilor cu un procent crescut de argilă, care să aibă valabilitate pe structuri diferite, constituie în prezent o problemă pentru interpretarea cantitativă. Dificultatea construirii abacelor în sensul arătat rezidă în faptul că particulele argiloase fixează o parte din apa sărată, ceea ce conduce la influențarea rezistivității rocilor pe de o parte, iar pe de altă parte potențialul spontan în dreptul rocilor cu procent ridicat de argile este un potențial pseudostatic, din care nu se poate deduce potențialul static.

Abacele prezentate în capitolele precedente pentru determinarea porozității, rezistivității reale și a saturației sînt pentru roci a căror matrice s-a considerat ca un izolator perfect și a căror conductivitate electrică se datorează numai apei interstițiale.

Datorită faptului că argilele fixează o parte din apa sărată, ceea ce influențează rezistivitatea lor, tehnica interpretării trebuie să fie diferită de a rocilor curate. Argilele care au fixat apă sărată se comportă ca un solid bun conducător de electricitate.

Argilele se găsesc în formațiuni fie sub formă laminată, fie diseminate în porii matricei rocii.

Argilele laminate se recunosc pe diagrafiile de microcarotaj printr-o succesiune de zone cu rezistivități ce alternează de la valori scăzute la valori mari. Rezistivitățile scăzute corespund argilelor laminate, iar rezistivitățile crescute zonelor invadate.

Potențialul spontan în dreptul formațiunilor cu argile laminate are aspectul unei curbe care seamănă cu dinții unui pieptene. Amplitudinile maxime ale PS-ului în dreptul formațiunilor menționate sînt inferioare celor din dreptul formațiunilor constituite din nisipuri sau gresii curate, chiar dacă s-au făcut corecții pentru grosimea stratelor, pentru rezistivitatea noroiului, pentru rezistivitatea zonei invadate și pentru rezistivitatea stratelor adiacente.

În dreptul formațiunilor argiloase (laminate sau dispersate) se înregistrează potențialul pseudostatic PS_{pseudo}. Raportînd potențialul pseudostatic la potențialul static PS_{st}, se obține factorul de reducere α:

$$\alpha = \frac{PS_{pseudo}}{PS_{st}} \qquad \text{(XVI.74)}$$

Potențialul spontan static al unei formațiuni cu argile laminate se determină în dreptul unui nisip curat superior sau inferior acesteia (cu condiția să se cunoască rezistivitatea apei de zăcămînt, iar nisipul și formațiunea cu argile laminate să aibă aceeași vîrstă geologică).

Formațiunile cu argile diseminate sînt reprezentate pe diagrafiile de microcarotaj în același mod ca și nisipurile curate: variațiile bruște sînt sporadice, predominînd liniile ușor ondulate.

Potențialul spontan în dreptul formațiunilor cu argile diseminate are valoare redusă, iar cînd $\rho_f \approx \rho_w$ valoarea PS-ului este foarte redusă.

Valorile de porozitate determinate pentru aceste formațiuni după curbele neutronice, sonice și gama-gama sînt diferite.

Argilele diseminate sînt mai puțin compacte decît argilele laminate. Pe baza datelor statistice, s-a admis că rezistivitatea argilelor diseminate ρ_d este 0,4 din valoarea rezistivității argilelor laminate ρ_l, care sînt mai compacte.

Rezistivitatea argilelor diseminate din zona invadată se determină cu relația

$$\rho_d = \rho_l \cdot \frac{\rho_f}{\rho_w} \qquad \text{(XVI.75)}$$

6.1. Determinarea porozității și conținutului în argile

Sînt mai multe metode pentru determinarea porozității rocilor argiloase, diferențiate între ele în funcție de diagrafiile utilizate. În sens general, metodele utilizate pentru determinarea porozității și conținutului în argile se împart în două categorii și anume: metode plecînd de la diagrafii de rezistivitate aparentă și metode plecînd de la diagrafii nucleare.

6.1.1. *Metode pentru determinarea porozității și conținutului în argile, utilizînd diagrafii de rezistivitate aparentă*

Din categoria acestor metode, aceea care a căpătat o largă răspîndire este a lui Poupon, Loy și Tixier (22), care va fi descrisă în continuare.

Pentru stabilirea relațiilor cu care să se determine porozitatea și procentul în argile a rocilor cu procent mai mare de 5% argile, autorii au plecat de la un model în care argilele sînt laminate. În acest caz, se consideră argilele laminate ca niște rezistențe conectate în paralel cu rezistența matricei poroase. Deci, rezistivitatea (rezistența) rezultată se va determina cu o relație de forma

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}, \qquad \text{(XVI.75 bis)}$$

în care: ρ este rezistivitatea rezultantă;
ρ_1 — rezistivitatea argilei laminate;
ρ_2 — rezistivitatea matricei rocii poroase.

Plecînd de la un model la care alternează argilele laminate, a căror rezistivitate este ρ_{arg}, cu nisip curat, a cărui rezistivitate este ρ_r^n, rezistivitatea reală globală ρ_r se determină cu relaţia

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{p}{\rho_{arg}} + \frac{1-p}{\rho_r^n} \text{ (zona necontaminată),} \qquad \text{(XVI.76)}$$

în care p este procentul de argilă.

Din relaţia cu care se determină saturaţia rocilor din zona necontaminată se poate deduce rezistivitatea reală a nisipului curat astfel:

$$S_w = \sqrt{\frac{F\rho_w}{\rho_r^n}} \qquad \text{(XVI.77)} \qquad \rho_r^n = \frac{F\rho_w}{S_w^2} \qquad \text{(XVI.78)}$$

Înlocuind valoarea lui ρ_r^n din relaţia XVI.78 în relaţia XVI.76 se obţine:

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{p}{\rho_{arg}} + \frac{(1-p)S_w^2}{F\rho_w} \qquad \text{(XVI.79)}$$

În zona invadată, relaţia care redă rezistivitatea globală este

$$\frac{1}{\rho_{xo}} = \frac{p}{\rho_{arg}} + \frac{1-p}{\rho_{xo}^n} \qquad \text{(XVI.80)}$$

Din relaţia cu care se determină saturaţia rocilor din zona invadată se poate deduce rezistivitatea nisipului acvifer curat (ρ_{xo}^n), astfel:

$$S_{xo} = \sqrt{\frac{F\rho_f}{\rho_{xo}^n}} \qquad \text{(XVI.81)} \qquad \rho_{xo}^n = \frac{F\rho_f}{S_{xo}^2} \qquad \text{(XVI.82)}$$

Înlocuind valoarea lui ρ_{xo}^n din relaţia XVI.82 în relaţia XVI.80 se obţine:

$$\frac{1}{\rho_{xo}} = \frac{p}{\rho_{arg}} + \frac{(1-p)S_{xo}^2}{F\rho_f} \qquad \text{(XVI.83)}$$

Din relaţiile XVI.79 şi XVI.83 se poate deduce valoarea procentului de argile p dacă se cunosc: $\frac{\rho_r}{\rho_{xo}}$, $\frac{S_w^2}{S_{xo}^2}$, $\frac{\rho_f}{\rho_w}$ şi $\frac{\rho_{arg}}{\rho_r}$, după cum urmează:

$$p = \frac{\frac{\rho_r}{\rho_{xo}} \cdot \frac{S_w^2}{S_{xo}^2} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_w} - 1}{\frac{S_w^2}{S_{xo}^2} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_w} - 1} \cdot \frac{\rho_{arg}}{\rho_r} \qquad \text{(XVI.84)}$$

În continuare, pentru stabilirea relațiilor cu ajutorul cărora se determină porozitatea rocilor argiloase, se stabilește o relație între PS_{st} și PS_{pseudo}.

$$PS_{st}=k \lg \frac{\rho_f}{\rho_w} \qquad \text{(XVI.85)}$$

Înlocuind în relația XVI.85 valorile lui ρ_f și ρ_w din relațiile XVI.86 și XVI.87, adică

$$S_w^2=\frac{F\rho_w}{\rho_r} \text{ de unde: } \rho_w=\frac{\rho_r S_w^2}{F} \qquad \text{(XVI.86)}$$

și

$$S_{xo}^2=\frac{F\rho_f}{\rho_{xo}} \text{ de unde: } \rho_f=\frac{\rho_{xo} S_{xo}^2}{F} \qquad \text{(XVI.87)}$$

se obține:

$$PS_{st}=-k \lg \frac{\rho_{xo}}{\rho_r} \cdot \left(\frac{S_{xo}}{S_w}\right)^2 \qquad \text{(XVI.87)}$$

Logaritmînd relația XVI.87 se obține:

$$PS_{st}=-k \lg \frac{\rho_{xo}}{\rho_r}-2k \lg \frac{S_{xo}}{S_w} \qquad \text{(XVI.88)}$$

Dependența dintre potențialul static PS_{st} și potențialul pseudostatic PS_{pseudo} este redată de relația:

$$PS_{pseudo}=\alpha PS_{st} \qquad \text{(XVI.89)}$$

Exprimînd PS_{pseudo} în funcție PS_{st}, relația XVI.88 devine:

$$PS_{pseudo}=\alpha k \lg \frac{\rho_{xo}}{\rho_r}-2\alpha k \lg \frac{S_{xo}}{S_w} \qquad \text{(XVI.90)}$$

Autorii metodei, studiind o serie de diagrafii PS în nisipuri argiloase, au arătat că în cazul nisipurilor saturate 100% cu apă de zăcămînt sărată, există relația:

$$PS_{pseudo}=-k \lg \frac{\rho_{xo}}{\rho_o} \qquad \text{(XVI.91)}$$

Luînd în considerare relația XVI.91, se ajunge la modificarea relației XVI.90, astfel:

$$PS_{pseudo}=-k \lg \frac{\rho_{xo}}{\rho_o}-2\alpha k \lg \frac{S_{xo}}{S_w} \qquad \text{(XVI.92)}$$

Autorii metodei au construit o abacă (v. fig. XVI.24) cu ajutorul căreia se determină porozitatea reală a rocilor argiloase cu un procent mai mare de 5%. Abaca din fig. XVI.24 este o soluție grafică a relatiilor XVI.79, XVI.83 și XVI.92.

Datele necesare pentru utilizarea abacei din fig. XVI.24 sînt:

$\frac{\rho_{xo}}{\rho_r}$; $\frac{\rho_{xo}}{\rho_f}$; α și S_{x_0}, respectiv S_{Hr}.

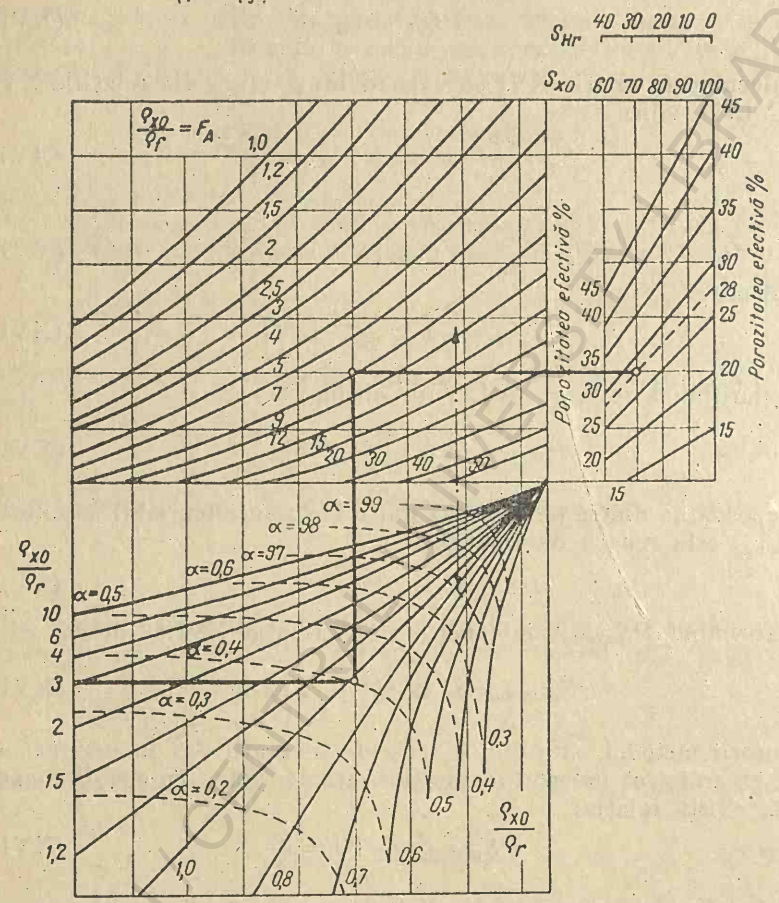


Fig. XVI.24. Abacă pentru determinarea porozității rocilor argiloase [22].

ρ_{x_0} se determină pe una din diagrafiile: microlaterolog, proximitilog, laterolog 8 sau normala scurtă avînd AM=0,4 m.

ρ_r se determină pe una din diagrafiile: inductiv, laterolog sau laterala avînd AO=18 picioare.

ρ_f se determină obișnuit în laborator, corectîndu-se la temperatura stratului studiat.

α este raportul dintre PS_{peudo} și PS_{st} (valori care se deduc din profilele PS).

S_{x_0} se determină cu relația XVI.87 sau printr-un alt procedeu.

S_{Hr} se determină cu relația $S_{Hr}=(1-S_{x_0})$ sau din date statistice.

Modul de utilizare a abacei din fig. XVI.24 este redat printr-un exemplu. Date: $\frac{R_{xo}}{\rho_r}=2{,}8$; $\alpha=0{,}4$; $\frac{\rho_{xo}}{\rho_f}=7$; $S_{xo}=72\%$.

Pe ordonata abacei (la partea inferioară) se notează valoarea raportului $\frac{\rho_{xo}}{\rho_r}=2{,}8$, de unde se trasează orizontala pînă intersectează curba α a cărei valoare este egală cu 0,4. Din punctul astfel obținut se ridică verticala pînă intersectează curba $\frac{\rho_{xo}}{\rho_f}$, a cărei valoare este egală cu 7. Din acest punct se trasează orizontala pînă intersectează verticala S_{x_0}, a cărei valoare este 72% (pe abaca din dreapta, această verticală nu este trasată, însă s-a interpolat). Din punctul astfel obținut se trasează o linie mai mult sau mai puțin paralelă cu dreptele înclinate ale abacei pînă intersectează una din scalele care indică porozitatea reală. Prin interpolare se găsește $\varnothing_{real}=28\%$.

6.1.2. *Metode pentru determinarea porozității și conținutului în argile plecînd de la diagrafii nucleare și sonice*

Cazul diagrafiilor neutronice. Porozitatea rocilor argiloase după diagrafii neutronice se calculează utilizînd relația

$$\varnothing_n=\varnothing+ap \qquad \text{(XVI.93)}$$

în care $\varnothing_n$ este porozitatea dedusă după diagrafii neutronice; $\varnothing$ — porozitatea utilă; a — un coeficient care indică procentul de apă reținut de argile; p — conținutul în argilă.

Din datele statistice s-a stabilit că valoarea coeficientului a variază între 40 și 50% (apă reținută de argile). Pentru majoritatea scopurilor practice se ia pentru a valoarea 0,5 și atunci relația XVI.93 devine:

$$\varnothing_n=\varnothing+0{,}5\,p \qquad \text{(XVI.94)}$$

Cazul diagrafiilor gama-gama. Porozitatea rocilor argiloase după diagrafii gama-gama se calculează cu relația

$$\varnothing_{\gamma\gamma}=\varnothing+p\frac{\delta_m-\delta_{arg}}{\delta_m-\delta_f} \qquad \text{(XVI.95)}$$

în care $\varnothing_{\gamma\gamma}$ este porozitatea determinată după diagrafii $\gamma\gamma$; $\varnothing$ — porozitatea utilă; δ_m — densitatea matricei; δ_{arg} — densitatea argilei; δ_f — densitatea fluidului; p — conținutul în argilă.

Raportul $\frac{\delta_m-\delta_{arg}}{\delta_m-\delta_f}$ are valori medii cuprinse între 0,1 la 0,2.

Cazul diagrafiilor sonice. Porozitatea rocilor argiloase după diagrafii sonice se calculează utilizînd relația

$$\varnothing_s=\varnothing+p\frac{\Delta t_{arg}-\Delta t_m}{\Delta t_f-\Delta t_m} \qquad \text{(XVI.96)}$$

în care: $\varnothing_s$ este porozitatea determinată după diagrafii sonice (Δt);
Δt_{arg} — timpul de propagare a semnalelor acustice prin argile;
Δt_m — timpul de propagare a semnalelor acustice prin matricea rocii;
Δt_f — timpul de propagare a semnalelor acustice prin fluide.

Raportul $\frac{\Delta t_{arg}-\Delta t_m}{\Delta t_f-\Delta t_m}$ are următoarele valori medii: pentru argile diseminate în porii rocii 0,4—1; pentru argile laminate 0,2—0,4.

În fiecare din relațiile XVI.94, XVI.95 și XVI.96 sînt cîte două necunoscute respectiv ø și p, deci vor fi suficiente două diagrafii din cele enumerate pentru aflarea necunoscutelor. Sînt 3 combinații și anume:

sonic ··· gama-gama;

neutron ··· gama-gama și

neutron-sonic.

Modul de calculare a necunoscutelor p și ø din cele trei combinații este același. Pentru exemplificare s-a ales combinația neutron-sonic.

$$\varnothing_n=\varnothing+0{,}5\,p \qquad \text{(XVI.97)}$$

$\varnothing_s=\varnothing+0{,}3\,p$ (cazul argilelor laminate)

Porozitatea determinată după diagrafia neutronică pentru exemplificare se consideră $\varnothing_n=0{,}3$, iar porozitatea determinată după diagrafia sonică se ia $\varnothing=0{,}25$. Înlocuind valorile lui $\varnothing_n$ și $\varnothing_s$ în ecuația XVI.97, se obține:

$$\begin{aligned}\varnothing+0{,}5\,p&=0{,}30\\ \varnothing+0{,}3\,p&=0{,}25\end{aligned} \qquad \text{(XVI.98)}$$

Rezolvînd ecuația de mai sus se obține:

$$\varnothing=17{,}5\%\ \text{și}\ p=25\%.$$

Pentru reducerea timpului de calcul a valorilor necunoscutelor ø şi p din ecuaţia XVI.98, s-au construit abace triunghiulare (v. fig. XVI.25). Modul de utilizare al abacei din figura menţionată este redat printr-un

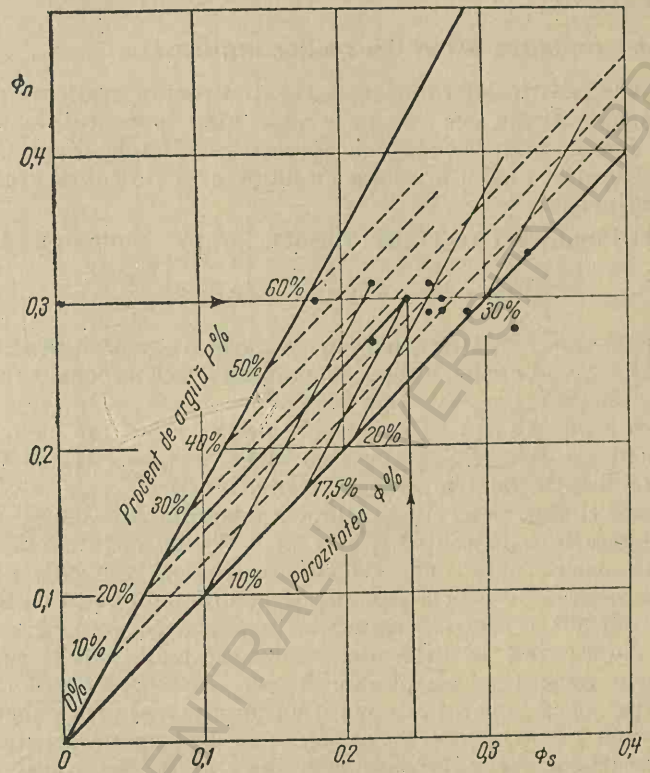


Fig. XVI.25. Abacă triunghiulară pentru determinarea procentului de argilă p şi a porozităţii rocilor o cu un procent de argilă 5 % argilă. Diagrafii utilizate: sonică şi neutronică.

exemplu în care datele sînt aceleaşi ca în cazul ecuaţiei XVI.98, adică $\varnothing_n=0{,}3$ şi $\varnothing_s=0{,}25$.

Se înscrie în ordonata abacei valoarea $\varnothing_n=0{,}3$; din punctul marcat se trasează orizontala pînă întîlneşte verticala ridicată din punctul de pe abscisă a cărui valoare $\varnothing_s=0{,}25$. Prin punctul de intersecţie obţinut se trasează o paralelă cu dreptele trasate cu linii întrerupte ale abacei pînă intersectează scala gradată în procente de conţinut de argilă p%.

Prin interpolare se găsește $p=25\%$. Tot prin punctul de intersecție se trasează o a doua dreaptă, paralelă cu dreptele trasate cu linii continui ale abacei, pînă intersectează scala gradată ø%. Prin interpolare se găsește $ø=17{,}5\%$.

6.2. Determinarea saturației rocilor argiloase

Formulele pentru determinarea saturației rocilor argiloase dau rezultate asemănătoare cu ale rocilor curate cînd procentul de argilă este sub 5 %, însă pe măsură ce procentul crește rezultatele diferă. Ca urmare, calculul saturației rocilor argiloase cu un procent ridicat de argilă are un caracter estimativ.

Metoda Popupon-Loy-Tixier (pentru argile laminate). În relația

$$PS_{pseudo} = -k \lg \frac{\rho_{xo}}{\rho_r} - 2\alpha K \lg \frac{S_{xo}}{S_w} \qquad \text{(XVI.99)}$$

se consideră $S_{x0}=f(S_w)$ de exemplu, $S_{x0}=\sqrt[5]{S_w}$; astfel, pentru diferite valori ale lui S_w se obține o rețea de paralele, dacă se consideră lg ρ_{x0}/ρ_r în funcție de PS_{pseudo} (v. fig. XVI.26).

Exemplu de utilizare a abacei din fig. XVI.26. Se consideră ca date $PS_{pseudo}=-65$ mV; $PS_{st}=-112$ mV; $K=80$ (obținut în funcție de temperatura formațiunii) și $\rho_{x0}/\rho_r=2{,}5$.

În primul rînd se determină saturația aparentă S_{wA} astfel: din punctul de intersecție a orizontalei dusă prin $K=80$ cu dreapta înclinată (de la baza abacei) notată cu -65 mV se trasează verticala pînă intersectează orizontala dusă prin punctul de pe ordonată notat cu 2,5. Punctul astfel obținut reprezintă saturația aparentă $S_{wA}=55\%$.

În al doilea rînd se determină saturația reală astfel: se trasează dreapta prin punctul a cărui abscisă este $PS=0$, iar ordonata este $\rho_{x0}/\rho_r=1$ (pe abacă punctul este notat cu un cerc), și prin punctul determinat anterior (de saturație $S_{wA}=55\%$); se prelungește această dreaptă pînă intersectează verticala dusă prin punctul de pe abscisă notat cu -112 mV. În felul acesta se obține punctul de saturație reală $S_w=37\%$.

Cînd se cunoaște saturația în hidrocarburi reziduale (de exemplu $S_{Hr}=30\%$) saturația în apă se determină utilizînd diagrama de la partea dreaptă a abacei. În acest scop, din punctul determinat anterior ($\rho_w=37\%$) se trasează o dreaptă paralelă cu liniile înclinate ale abacei principale și în continuare se trasează o orizontală pînă intersectează verticala din abaca ajutătoare trasată prin punctul de pe abscisă de saturație în hidrocarburi reziduale $S_{Hr}=30\%$. Punctul astfel obținut reprezintă saturația stratului numai în apă (fără hidrocarburi reziduale) egală cu 30% (valoarea de 30% se citește pe scala gradată a abacei din partea dreaptă unde linia curbă o intersectează (în unele cazuri sînt necesare interpolări).

Metoda Hossin plecînd de la relația lui Archie. Într-un eșantion de rocă cu latura egală cu unitatea, distribuția schematizată a apei, petrolului, argilei și matricei sînt ca în ifg. XVI.27.

Rezistivitatea eșantionului de rocă este determinată de rezistivitatea apei și de rezistivitatea argilei. Dacă se consideră apa de zăcămînt și

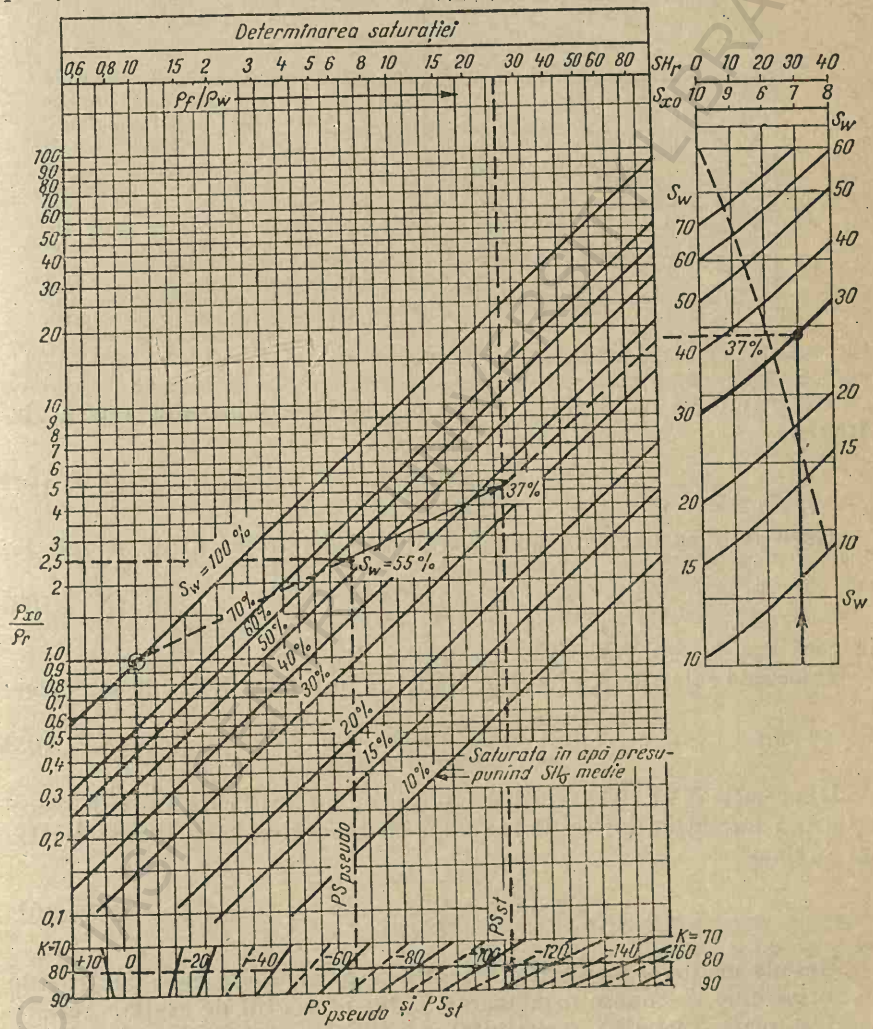


Fig. XVI.26. Abacă pentru determinarea saturației rocilor argiloase după metoda Poupon-Loy-Tixier [3].

argila ca niște rezistențe conectate în paralel, atunci rezistivitatea reală globală a eșantionului de rocă ρ_r se determină cu relația

$$\rho_r = \frac{1}{\rho_{apă}} + \frac{1}{\rho_{arg}} \qquad \text{(XVI.100)}$$

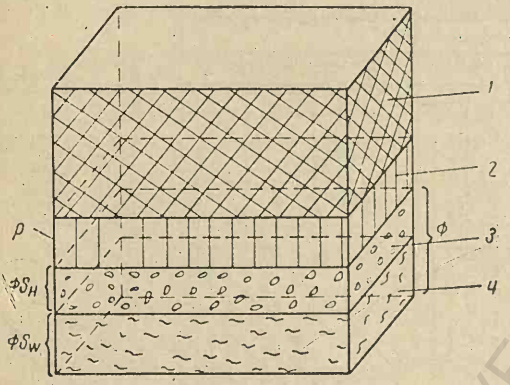


Fig. XVI.27. Reprezentare schematizată a distribuției fluidelor, argilei și matricei într-un eșantion de rocă: *1* — matricea rocii; *2* — argilă *3* — petrol; *4* — apă de zăcământ; $\varnothing S_w$ — volumul ocupat de apa de zăcământ din volumul vid; $\varnothing S_{Hr}$ — volumul ocupat de petrol din volumul vid; *p* — volumul ocupat de argilă în procente de volum; $\varnothing$ — porozitatea totală sau vidul total.

Rezistivitatea datorată numai apei se determină din relația lui Archie:

$$\rho_{apă} = \frac{\rho_w}{(\varnothing S_w)^2} \qquad \text{(XVI.101)}$$

Rezistivitatea datorată numai argilei se determină utilizînd relația:

$$\rho_{arg} = \frac{\rho_{arg \cdot d}}{p^2} \qquad \text{(XVI.102)}$$

în care $\rho_{arg \cdot d}$ este rezistivitatea argilei dispersate.

Înlocuind relațiile XVI.101 și XVI.102 în relația XVI.100 se obține:

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{\rho_w}{(\varnothing S_w)^2} + \frac{p^2}{\rho_{arg \cdot d}} \qquad \text{(XVI.103)}$$

Din relația XVI.103 se obține expresia cu ajutorul căreia se calculează saturația formațiunilor argiloase după metoda Hossin, utilizînd relația lui Archie:

$$\varnothing S_w = \sqrt{\rho_w \left(\frac{1}{\rho_r} - \frac{p^2}{\rho_{arg \cdot d}} \right)} \qquad \text{(XVI.104)}$$

Metoda argilelor laminate. O relație asemănătoare cu a lui Hossin se obține cînd se cunosc următoarele date: procentul de argilă, rezistivitatea reală globală, rezistivitatea argilelor laminate, porozitatea utilă și rezistivitatea apei de zăcământ.

Relaţia obţinută după metoda argilelor laminate se utilizează în cazul alternanţei de argile laminate cu strate de nisip subţiri (v. fig. XVI.28).

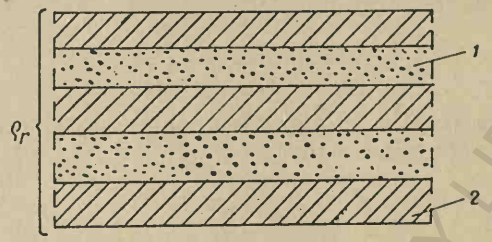


Fig. XVI.28. Alternanţă de argile laminate cu strate de nisip subţiri:

1 — nisip curat avînd rezistivitatea reală ρ_r^n;

2 — argilă laminată avînd rezistivitatea $\rho_{arg \cdot l}$;

ρ_r — rezistivitatea reală globală.

Argilele laminate şi stratele subţiri de nisip se consideră conectate în paralel. În această situaţie, relaţia cu care se calculează rezistivitatea reală globală este:

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{p}{\rho_{arg \cdot l}} + \frac{1-p}{\rho_r^n} \qquad \text{(XVI.105)}$$

în care: ρ_r este rezistivitatea reală globală a formaţiunii, în ohm · m;

p — procentul de argilă în volume;

$\rho_{arg \cdot l}$ — rezistivitatea reală a argilelor laminate, în ohm · m;

ρ_r^n — rezistivitatea reală a nisipului curat, în ohm · m.

Rezistivitatea reală a nisipului curat se deduce din relaţia lui Archie:

$$S_w = \sqrt{\frac{\rho_w}{o^2 \rho_r^n}} \qquad \text{(XVI.106)}$$

$$\rho_r^n = \frac{\rho_w}{(oS_w)^2} \qquad \text{(XVI.107)}$$

în care S_w este saturaţia în apă a nisipului curat.

Înlocuind relaţia XVI.107 în relaţia XVI.105 se obţine:

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{p}{\rho_{arg \cdot l}} + \frac{(1-p)(oS_w)^2}{\rho_w} \qquad \text{(XVI 108)}$$

Din relaţia XVI.108 se obţine relaţia utilizată în metoda argilelor laminate pentru determinarea saturaţiei formaţiunilor argiloase în care alternează strate subţiri de nisip curat cu argile laminate (v. fig. XVI.28):

$$oS_w = \sqrt{\frac{\rho_w}{1-p}\left(\frac{1}{\rho_r} - \frac{p}{\rho_{arg \cdot l}}\right)} \qquad \text{(XVI.109)}$$

Metoda Simandoux. Relația stabilită de Simandoux pentru determinarea saturației formațiunilor argiloase se aplică numai în cazul formațiunilor la care argilele sînt diseminate în porii rocii. Relația se obține plecînd de la formula

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{1}{\rho_{arg}} + \frac{1}{\rho_{apă}} \qquad \text{(XVI.110)}$$

Rezistivitatea reală a argilei diseminate ρ_{arg} și rezistivitatea apei singure $\rho_{apă}$ se determină astfel:,

$$\rho_{arg} = \frac{\rho_{arg \cdot d}}{p} \qquad \text{(XVI.111)}$$

$$\rho_{apă} = \frac{\rho_w}{(\varnothing S_w)^2} \qquad \text{(XVI.112)}$$

(se deduce din relația lui Archie).

Înlocuind relațiile XVI.111 și XVI.112 în relația XVI.110 se obține:

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{p}{\rho_{arg \cdot d}} + \frac{(\varnothing S_w)^2}{\rho_w} \qquad \text{(XVI.113)}$$

Din relația XVI.113 se obține relația cu ajutorul căreia se calculează saturația formațiunilor argiloase după metoda Simandoux:

$$\varnothing S_w = \sqrt{\rho_w \left(\frac{1}{\rho_r} - \frac{p}{\rho_{arg \cdot d}} \right)} \qquad \text{(XVI.114)}$$

Relația lui Simandoux se aplică cînd produsul $\varnothing S_w$ este superior unei anumite limite, $\varnothing S_{w1}$, a cărei valoare se obține din relația:

$$\varnothing S_{w1} = \varnothing S_{w0} + 31 \times 6 \cdot 10^{-4} p S \sqrt{\rho_w} \qquad \text{(XVI.115)}$$

în care: p este procentul de argilă diseminată în volume;
S — suprafața specifică a argilei în m²/g;
ρ_w — rezistivitatea apei de zăcămînt în ohm · m.

Valorile lui S pentru argilele uzuale sînt:

montmorilonit $S = 730$ m²/g

ilit $S = 110$ m²/g

caolinit $S = 40$ m²/g.

În cazul cînd valoarea produsului $\varnothing S_w$ este cuprinsă între limitele

$$\varnothing S_{w0} < \varnothing S_w < \varnothing S_{w1} \qquad \text{(XVI.116)}$$

efectul argilei diseminate asupra saturației rocilor argiloase se corectează cu factorul α. Acest factor variază liniar între $\alpha=1$ pentru $\varnothing S_{w1}$ și $\alpha=0$ pentru $\varnothing S_{w0}$, după cum este indicat în fig. XVI.29.

În cazul cînd produsul $\varnothing S_w$ este cuprins între valorile menționate în relația XVI.116 atunci relația XVI.114 devine

$$\varnothing S_w=\sqrt{\rho_w\left(\frac{1}{\rho_r}-\alpha\frac{p}{\rho_{arg\cdot d}}\right)} \qquad \text{(XVI.117)}$$

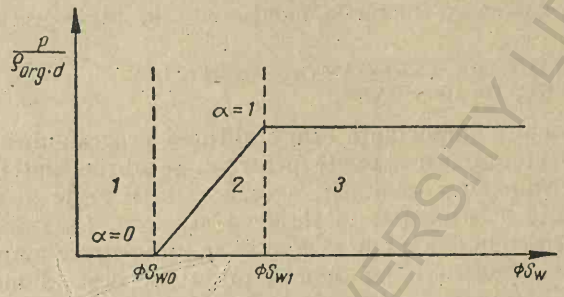


Fig. XVI.29. Diagrama variației factorului α :
p — procent de argilă; $\rho_{arg\cdot d}$ — rezistivitatea argilelor diseminate; $\varnothing S_{w0}$ — limită pentru care $\alpha=0$; $\varnothing S_{w1}$ — limită pentru care $\alpha=1$; *1* — domeniu în care $\alpha=0$; *2* — domeniu în care α variază de la 0 la 1; *3* — domeniu în care $\alpha=1$; α — factor pentru corectarea influenței argilelor asupra saturației rocilor argiloase cînd $\varnothing S_{w0}<\varnothing S_w<\varnothing S_{w1}$.

Cînd valoarea produsului $\varnothing S_w \leqslant \varnothing S_{w0}$, atunci α are valoarea zero, deci relația XVI.117 devine în fond o relație Archie (v. rel. XVI. 118), deci cazul formațiunilor curate în care argilele fiind sub un procent de 5% nu influențează saturația rocilor.

$$\varnothing S_w=\sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_r}} \qquad \text{(XVI.118)}$$

Valoarea produsului $\varnothing S_0$ se obține cu relația:

$$\varnothing S_{w0}=7{,}5\times10^{-4}\,pS \qquad \text{(XVI.119)}$$

în care p și S au aceleași semnificații ca în relația XVI.115.

Metoda Schlumberger pentru determinarea saturației formațiunilor argiloase la care argilele sînt diseminate în porii rocii are la bază o relație care se deduce în linii generale ca în cazul metodelor descrise mai sus:

$$\frac{1}{\rho_w}(\varnothing S_w)^2+p\left(\frac{1}{\rho_w}+\frac{1}{\rho_{arg\cdot d}}\right)\varnothing S_w+\frac{p^2}{\rho_{arg\cdot d}}-\frac{1}{\rho_r}\Big)=0 \qquad \text{(XVI.120)}$$

Notaţiile din relaţia XVI.120 sînt aceleaşi ca în relaţiile descrise mai sus.

Concluzii. Interpretarea diagrafiilor înregistrate în găuri de sondă care au traversat formaţiuni argiloase este mai complicată decît în cazul formaţiunilor curate.

Determinarea porozităţii şi saturaţiei după abace este deseori satisfăcătoare, însă pentru aceasta trebuie utilizate aparate perfecţionate. Date suplimentare despre determinarea porozităţii şi saturaţiei rocilor argiloase se găsesc în lucrările menţionate la bibliografie [21, 22].

7. PROGRAME DE INVESTIGARE GEOFIZICĂ A GĂURILOR DE SONDĂ

De o deosebită importanţă este stabilirea programului operaţiunilor ce trebuie efectuate într-o sondă pentru a se obţine datele necesare în vederea determinării porozităţii, a rezistivităţii reale a stratelor şi în ultimă instanţă a saturaţiei în fluide a acestora. La stabilirea programului de lucru trebuie avut în vedere să se înregistreze numai diagrafiile strict necesare, pentru a nu scumpi preţul de cost al metrului forat.

Metodele de investigare se aleg în funcţie atît de condiţiile din gaura de sondă cît şi de cele din formaţiuni. Prima se referă la tipul fluidului de foraj, iar a doua la gradul de consolidare a formaţiunii şi la felul porozităţii.

Programul geofizic de investigare a unei sonde prevede diagrafii de bază, care se referă la determinarea rezistivităţii reale a zonei necontaminate sau a rezistivităţii zonei spălate, eventual a zonei invadate, diagrafii suplimentare, avînd acelaşi obiectiv ca cele de bază, metode pentru determinarea porozităţii, metode pentru identificarea naturii fluidului care saturează porii rocilor şi metode pentru obţinerea de informaţii despre permeabilităţile şi productivităţile stratelor interesate.

În tabelul 18 sînt redate programele de investigare geofizică a găurilor de sondă recomandate de firmele din S.U.A., cînd se forează cu noroi nemineralizat, iar în tabelul 19 sînt recomandate programele de investigare geofizică a găurilor de sondă recomandate de firmele din S.U.A. cînd se forează cu noroi mineralizat, cu noroi pe bază de produse petroliere (fluide negre), fără noroi şi pentru găuri tubate.

În tabelul 20 sînt redate programele de investigare geofizică a găurilor de sondă recomandate de catedra de geofizică de sondă din cadrul Institutului de Petrol, Gaze şi Geologie din Bucureşti.

Pentru exemplificarea modului în care se pot alege dispozitivele optime de investigare se redau două diagrafii reprezentative pentru cazurile frecvent întîlnite în ţară:

— formaţiuni consolidate şi noroi pe bază de apă dulce (v. fig. XVI.30)

— formaţiuni consolidate şi noroi sărat (v. fig. XVI.31).

Tabelul 18

Programe de investigare geofizică a găurilor de sondă recomandate de firmele din S.U.A. cînd se forează cu noroi nemineralizat

Tipul formațiunii	Firma	Programul de bază (minimal)	Programul adițional	Programul pentru determinarea porozității			Programul pentru identificarea naturii fluidului
				de bază	adițional	eventual	
Neconsolidată, cu porozitate mare	Schlumberger	PS-16″-64″-19′ ML-cavernometrie	—	γγ compensat	sonic	—	Curba clorului
		PN-16″ sau LL8-6FF40 ML-cavernometrie	64″ (sau IL)	idem	idem	—	
		Grand-Slam: PL-LL8 5FF 40-6FF40-PS-cavernometrie	—	idem	idem		
	Lanewells	PS-16″-64″-19′-ML cavernometrie	—	idem	idem	—	Curba clorului utilizînd generatorul de neutroni
		PS-16″-38″-64″-18′ ML-cavernometrie	64″ (sau IL)	idem	idem	—	
	P.G.A.G.	PS-16″-38″-64″-18′ ML-cavernometrie	—	—	—	—	Spectroscopie + parametrii acustici
		PS-16″ SDI60-ML-cavernometrie	64″ (sau IL)	—	—	—	
	Welex	PS-18″-9′-16′-ML-cavernometrie	—	—	—	—	
		PS-18″-IL-cavernometrie	64″ (sau IL)	—	—	—	—
Consolidată, cu porozitate medie	Birdwell	PS-16″-64″-15″ ML-cavernometrie	—	—	—	—	—
	Schlumberger	PS-16″-19″-ML-cavernometrie	—	sonic	γγ compensat	—	*nγ* sau *nn* cu două distanțe + curba clorului
		PS-16″ sau LL8-6FF40-ML-cavernometrie	64″ (sau IL)	idem	idem	—	
		Grand Slam + PS+ +cavernometrie	—	idem	idem	—	

Tabelul 18 (continuare)

Tipul noroiului	Firma	Programul de bază (minimoal	Programul adițional	Programul pentru determinarea porozității			Programul pentru identificareaa naturii fluidului
				de bază	adițional	eventual	
Consolidată, cu porozitate medie	Lane-Wells	PS-16″-64″-19′-ML cavernometrie	—	idem	idem	—	$n\gamma$ sau *nn* cu două distanțe + curba clorului
		PS-16″-IL-ML-cavernometrie	64″ (sau IL)	idem	idem	—	
	P.G.A.C.	PS-16″-64″-18′-ML-cavernometrie	—	idem	idem	—	Parametri acustici + spectrometrie
		PS-16″-SIDI 60-ML cavernometrie	64″ (sau IL)	idem	idem	—	
	Wellex	PS-18″-9′-16′-ML cavernometrie	—	—	—	—	—
		PS-18″-IL-cavernometrie	64″ (sau IL)	—	—	—	
	Birdwell	PS-16″-64″-15′-ML cavernometrie					$n\gamma$ sau *nn* cu două distanțe
Dure (calcare + dolomite) cu porozitate scăzută	Schlumberger	PS-16″-64″-19′-ML cavernometrie	—	sonic	$\gamma\gamma$-compensat	+	$n\gamma$ sau *nn* cu două distanțe + curba clorului
		PS-10″-disp. pt. calcare: 32″ sau idem 37.1/2″-19′-ML, cavernometrie	64″	idem	idem	idem	
		PS-LL 3 (sau MI)-cavernometrie pt. $\rho_r < 200$ ohm · m	—	idem	idem	idem	
		Grand-Slam + PS + + cavernometrie	—	idem	idem	idem	
		PS-16″ (sau LL8)-6FF40 ML-cavernometrie ($\rho_r < 200$ ohm · m)	—	idem	idem	idem	

BCU Cluj / Central University Library

Dure (calcare + dolomite cu porozitate scăzută	Lane-Wells	PS-16″-64″-19′-ML-cavernometrie	—	sonic	γγ compensat	γ+nγ	nγ sau *nn* cu două distanțe + curba clorului (generator de neutroni)
		PS-10″ disp. pentru calcare 32″-ML-cavernometrie	64″	idem	idem	idem	
		PS-16″-IL-ML-cavernometrie	64″ (sau IL)	idem	idem	idem	
	P.G.A.C.	PS-16″-38″-64″-18′ ML-cavernometrie					Spectrometrie + parametrii acustici
		PS-10″-disp. pt. calcare 32″-18′ ML-cavernometrie	64″	idem	idem	idem	
		PS-16″-6 FF40-ML-cavernometrie	54″ (sau IL)	idem	idem	idem	
	Wellex	PS-18″-9′-16′-ML cavernometrie	—	idem	idem	γ+nγ	
		PS-10″-disp. pt. calcare-16′-ML-cavernometrie	64″	—	—	idem	
		PS-18″-IL-ML-cavernometrie	64″	—	—	idem	
	Birdwell	PS-16″-64″-15′-ML-cavernometrie	—		sonic	idem	nγ sau *nn* cu două distanțe

BCU IASI / COLECTIA UNIVERSITY LIBRARY

Tabelul 19

Programe de investigare geofizică a găurilor de sondă recomandate de firmele din S.U.A. cînd se forează cu noroi mineralizat, noroi pe bază de produse petroliere, fără noroi și pentru găuri tubate

Tipul noroiului	În ce fel de gaură se face măsurarea	Tipul formațiunii	Firma	Programul de bază	Programul pentru determinarea porozității		Programul pentru identificarea fluidului
					formațiuni moi	formațiuni consolidate	
Noroi sărat	Netubată, plină cu noroi sărat	Orice fel de formațiune	Schlumberger	γ-*n*γ-6FF40-ML sau MLL-cavernometrie	γγ compensat	sonic	*n*γ sau *nn* cu două distanțe
				γ-*n*γ, LL 3 sau 7-MLL-cavernometrie ohm · m	idem	idem	idem
			Lane-Wells	γ-*n*γ-LL 3 sau 7-MLL-cavernometrie	idem	idem	idem
			P.G.A.C.	γ-*n*γ-LL 3 sau 7-MLL-cavernometrie	idem	idem	parametri acustici
			Velex	γ-*n*γ-LL 3 sau 7-MLL-cavernometrie	idem	idem	*n*γ sau *nn* cu două distanțe
			Birdwell	γ-*n*γ-LL 3 sau 7-MLL-cavernometrie	idem	idem	idem
Noroi pe bază de produse petroliere	Netubată, plină cu noroi pe bază de produse petroliere	Orice fel de formațiune	Schlumberger	IL-γ-*n*γ-sonic	γγ compensat		—
			Lane-Wells	IL-γ-*n*γ-sonic	idem		—
			P.G.A.C.	IL-γ-*nn*-sonic	idem		—
			Welex	IL-γ-*n*γ-sonic	idem		—
			Birdwell	IL-γ-*n*γ-sonic	idem		—

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Sonde săpate fără noroi	Netubată, fără noroi de foraj	Orice fel de formaţiune	Schlumberger	IL-γ-$n\gamma$-$\gamma\gamma$ compensat-cavernometrie	—	—
			Lane-Wells	IL-γ-$n\gamma$-$\gamma\gamma$ compensat-cavernometrie	—	—
			P.G.A.C.	IL-γ-nn-cavernometrie-T°	—	parametri acustici
			Welex	IL-γ-$n\gamma$-cavernometrie-T°	—	—
			Birdwell	IL-γ-$n\gamma$-cavernometrie T°	—	
Găuri tubate	Tubată	Orice fel de formaţiune	Schlumberger	γ-$n\gamma$	—	diagrafia clorului
			Lane-Wells	γ-$n\gamma$	—	idem
			P.G.A.C.	γ-nn	—	idem
			Welex	γ-$n\gamma$	—	idem
			Birdwell	γ-$n\gamma$	—	idem

BU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Programul minimal pentru investigarea forajelor

Felul fluidului de foraj	Felul faciesului	Diagrafii pentru determinarea rezistivității reale și diagrafii de corelare — programul minimal —	Diagrafii pentru determinarea porozității
Noroi neminerализat	Facies nisipos, grezos, marnos; (roci slab consolidate, de consolidare medie și consolidate)	1. Una din diagrafiile electrice convenționale — diagrafia electrică standard; — diagrafia electrică P.G.A.C. (metoda celor trei normale) 2. Una din diagrafiile: — inductivă cînd $\rho_r < (60-80)$ ohm · m; — laterolog 3 sau 7 cînd $\rho_r < (60-80)$ ohm · m; — BKZ sau DRR 3. Pentru separarea stratelor subțiri: — microcarotajul 4. Microcavernograma sau cavernograma	1. Diagrafia sonică și neutronică; 1. De la caz la caz una din diagrafiile: — curba normală de mică investigare; — microcarotajul; — microlaterologul
Noroi mineralizat	Facies calcaros, dolomitic, marnocalcaros (roci dure)	1. Una din diagrafiile electrice convenționale: — diagrafia electrică standard; — diagrafia electrică P.G.A.C. (metoda celor trei normale). 2. Una din diagrafiile: — inductivă cînd $\rho_r < (60-80)$ ohm · m; — laterolog 3 sau 7 cînd $\rho_r > (60-80)$ ohm · m; — curbe laterale (gradiente cu lungime mare 3. Pentru separarea stratelor subțiri și a zonelor poroase și permeabile; — microcarotajul 4. Microcavernograma sau cavernograma	1. Diagrafia sonică și neutronică 1'. De la caz la caz — diagrafia gradientă simetrică; — microlaterolog

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITARA

de prospecțiune sau de referință

Diagrafii pentru determinarea rezistivității apei de zăcământ	Diagrafii auxiliare pentru determinarea naturii fluidelor	Diagrafii auxiliare pentru metodele geofizicii de suprafață	Observații
Diagrafia PS, sau măsurarea rezistivității apelor de zăcământ,	— Gazcarotajul; — Termocarotajul; — Diagrafia clorului; — Diagrafia neutronică cu două distanțe	Diagrafia sonică, care va fi efectuată pe întreaga gaură de sondă în vederea determinării vitezelor de strat. În același scop se vor efectua puncte de control prin seismocarotaje acolo unde există un carotaj sonic și seismocarotaj (cu puncte mai dese) acolo unde nu există carotaj sonic.	În cazul sondelor de mare adîncime diagrafiile gama și neutron-neutron se includ în programul minimal, fiind utilizate la perforarea diverselor intervale. Se recomandă să fie executate înainte de tubaj.

BCU IAȘI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Felul fluidului de foraj	Felul faciesului	Diagrafii pentru determinarea rezistivității reale și diagrafii de corelare — programul minimal —	Diagrafii pentru determinarea porozității
Noroi mineralizat	Orice facies	1. Pentru salinități de 60 g/l una din diagrafiile electrice convenționale: — diagrafia electrică standard sau diagrafia electrică P.G.A.C. (pentru corelare) + diagrafia laterolog 3 sau 7 (pentru rezistivitatea reală) 1′. Pentru salinități de 60 g/l: — diagrafia laterolog 3 sau 7 (pentru rezistivitatea reală) + diagrafii gama eventual neutron-neutron (neutron-gama) (pentru corelare) 2. Microcavernograma sau cavernograma.	1. Diagrafia sonică și neutronică 1′. Microlaterologul
Noroi pe bază de produse petrolifere	Orice facies	1. Diagrafia inductivă (pentru rezistivitatea reală) + gama eventual neutron-neutron (neutron-gama) (pentru corelare) 2. Microcavernograma sau cavernograma	Diagrafia neutron-neutron
Sonde tubate	Orice facies	Diagrafia gama + neutron-neutron (neutron-gama)	Orientativ: — diagrafia neutron-neutron

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tabelul 20 (continuare)

Diagrafii pentru determinarea rezistivității apei de zăcămînt	Diagrafii auxiliare pentru determinarea naturii fluidelor	Diagrafii auxiliare pentru metodele geofizicii de suprafață	Observații
Măsurarea rezistivității apelor de zăcămînt	— Gazcarotajul; Termocarotajul; — Diagrafio clorului: — Diagrafia neutronică cu două distanțe. — Parametrii acustici	Diagrafia sonică, care va fi efectuată pe întreaga gaură de sondă în vederea determinării vitezelor de strat. În același scop se vor efectua puncte de control prin seismocarotaje acolo unde există un carotaj sonic și seimocarotaj (cu puncte mai dese) acolo unde nu există carotaj sonic.	În cazul sondelor de mare adîncime, diagrafiile gama și neutron-neutron se includ în programul minimal, fiind utilizate la perforarea diverselor intervale. Se recomandă să fie executate înainte de tubaj.
Măsurarea rezistivității apelor de zăcămînt	— Diagrafia clorului; — Termocarotajul	Seismocarotaj	idem
Idem	Idem	Seismocarotaj	Idem

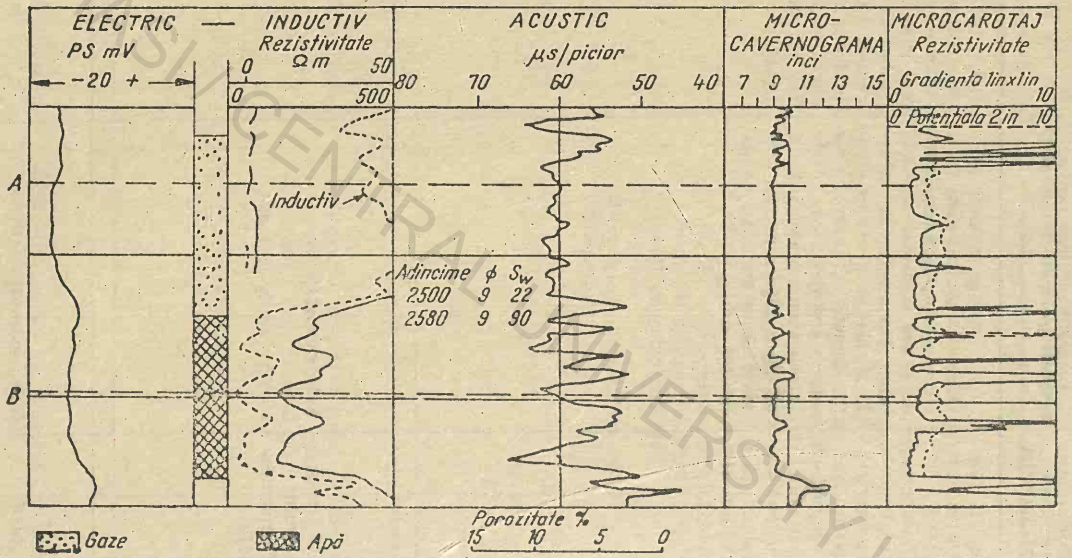


Fig. XVI.30. Diagrafie complexă înregistrată în formațiuni consolidate-noroi pe bază de apă dulce.

BCU BIBLIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITARĂ LIBRARY

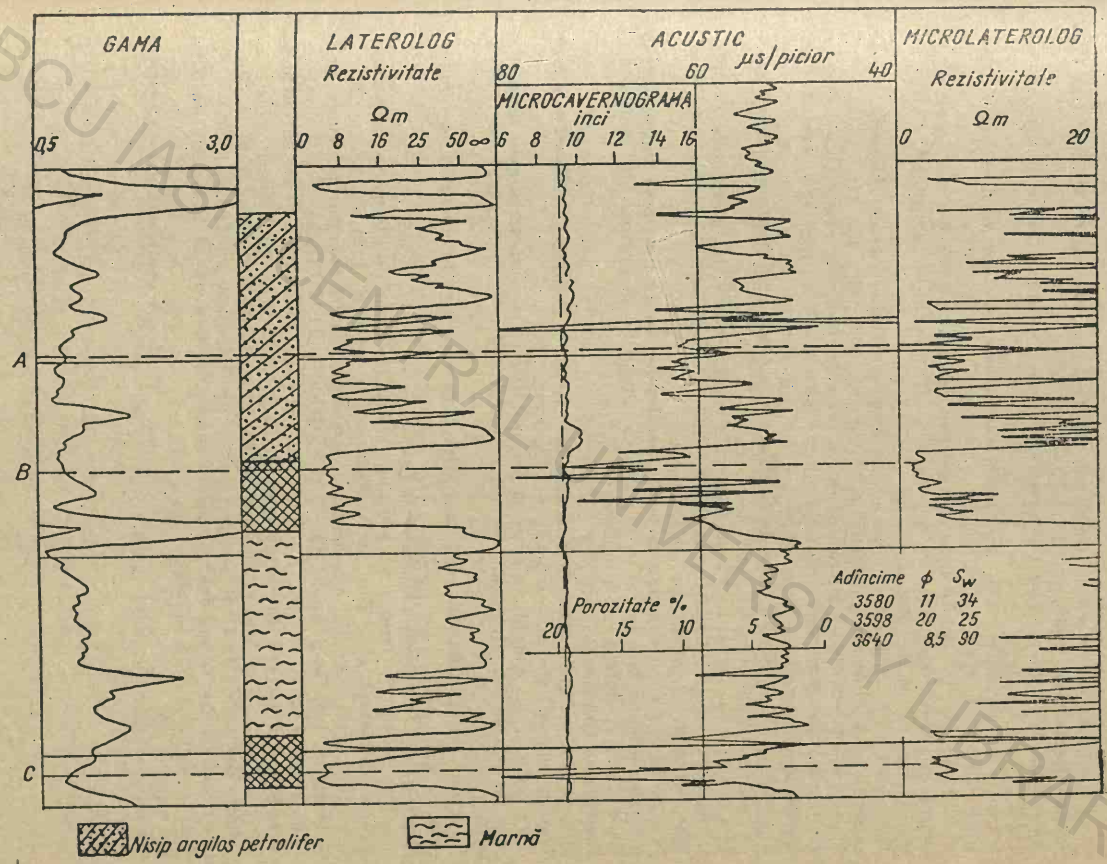


Fig. XVI.31. Diagrafie complexă înregistrată în formațiuni consolidate — noroi sărat.

BCU IAȘI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BIBLIOGRAFIE

3. Pirson, J. Silvain. **Handbook of Well log Analysis for Oil and Gas Formation Evaluation.** 1963, pp. 253—259, 293—298.
4. Schlumberger. **Log interpretation Carts.** Document Schlumberger, Paris, 1966.
5. Schlumberger. **Log interpretation Principles.** Document Schlumberger, Paris, 1963.
6. Tixier, M. P. **Analiza diagrafiilor moderne.** În: Exploatarea și prelucrarea petrolului. Caiet selectiv 8, nr. 6, iun. 1963. Traducere din Journal of Petroleum Technology 14, nr. 12, dec. 1962, pp. 1327—1336.
7. Lebertoix, Francisque ș.a. **Log Combining Refines Porosity Messurement.** În: Petroleum Management, 35, nr. 13, dec. 1963, pp. 116—144.
8. Popov, V. K. ș.a. **Microcarotajul o metodă eficace de cercetare a sondelor.** În: Exploatarea și prelucrarea petrolului nr. 6, iun. 1960, p. 35. Traducere din Gazovaia Promîșlennosti, 4, nr. 10, oct. 1859, pp. 10—12.
9. Misk, A. Poupon. **How to Evaluate Gas Zones with Neutron-Density Logs.** Petroleum Engineer, ian. 1963.
10. Hamilton, R. Gr. **Progrese recente în diagrafie și în interpretare.** Noutăți în Geologie-Geofizică — 349, decembrie 1962, pp. 66—67. Traducere din Vorld Oil. Vol. 154, nr. 5, aprilie 1961.
11. Negoiță, V. **Utilizarea metodei raporturilor în interpretarea măsurătorilor geofizice.** Comunicare la cel de-al patrulea simpozion de prospecțiuni geofizice și fizica scoarței globului în România, 5—7, iulie 1966.
12. **Loganalysis Handbook,** P.G.A.C., 1966.
13. Rodermund, G. G. et a. **Empty-hole Logging Programs for Reservoir Evaluation.** The Oil and Gas Journal, nr. 12, June, 1961.
14. Jacquin, C. **Corelation entre la perméabilité et les caractéristiques géométriques du gres de Fontaiebleau.** Revue I.F.P. Vol. XIX. nr. 7, 8 Julie, Aout, 1964, p. 921.
15. Petcu G. I. **Metodele cele mai eficace de cercetare în lucrările geologice,** C.D.I.I.M.P., 1963.
16. **Realizări noi în diagrafia sondelor de țiței și gaze,** I.D.T., 1965, pp. 35—37.
17. Moulenes, B. **Origin des pressions anormales dans les gisements de pétrole.** Etude bibliographique. Rev. Inst. Français du Pétrole, 1961, XIX, 2, 196.
18. Mc Gregor, I. R. **Quantitative determination of reservoir pressures from conductivity log.** Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol. Sept. 1965.
19. Hattmann, C. E. et Johnson, R. K. **Estimation of formation pressures from log derived shale properties.** J. Petrol Technol. June 1965, p. 717.
20. Byramjes, R. **Argiles non compactées et pressions anormales.** Cas du Nord-Sahara. Revue de l'Institut Français du Pétrole 7/8, 1966, pp. 1067—1077.
21. Houssin, A. **Calcul des saturations en eau par la méthode du ciment argileux.** Bulletin A.F.T.P. Mars, 1960.
22. Poupon, A. Loy, M. E. Tixier, M. P. **A contribution to electrical log interpretation in shaly sands.** I.P.T. June, 1954.

CAPITOLUL XVII

INTERPRETAREA DIAGRAFIILOR CU MAȘINI ELECTRONICE

Ca urmare a perfecționării dispozitivelor de investigare a găurilor de sondă a fost posibil să se treacă la interpretarea diagrafiilor cu mașini electronice. În acest sens este semnificativ să se arate posibilitatea determinării rezistivității reale a formațiunilor direct după diagrafiile inductive sau laterolog.

Interpretarea diagrafiilor cu mașini electronice a început din anul 1960. Într-o perioadă relativ scurtă, tehnica interpretării diagrafiilor cu mașini electronice s-a dezvoltat rapid, datorită faptului că prin ea se scurtează timpul de interpretare și se asigură o precizie mare a calculelor. De exemplu, la interpretarea diagrafiei Grand Slam* cu ajutorul mașinilor electronice tip IMB-704 s-au prelucrat 100 de intervale în 10 minute, iar cu mașina IBM-7090, același număr de intervale au fost interpretate în 1,5 minute, în timp ce pentru un interpretator experimentat ar fi fost necesare minimum 20 min pentru fiecare interval.

În cele ce urmează se vor expune sumar principiile interpretării diagrafiilor cu mașini electronice prin înregistrarea datelor pe bandă perforată și pe bandă magnetică.

1. INREGISTRAREA PE BANDĂ PERFORATĂ

Pe benzile perforate utilizate de firma Schlumberger se pot înregistra la fiecare adîncime două informații, care pot fi identificate prin găurile de pe șirurile *9* și *10* (v. fig. XVII.1). Să presupunem că pe banda din fig. XVII.1 se transpun valori de rezistivitate după o diagrafie inductivă și o diagrafie înregistrată cu dispozitiv normal scurt (16 in). Valorile de rezistivitate de pe diagrafia inductivă se regăsesc pe bandă pe canalul *1* corespunzător șirului *10* de găuri, iar valorile de rezistivitate de pe diagrafia înregistrată cu dispozitivul normal scurt 16 in se regăsesc pe bandă pe canalul *2* corespunzător șirului *9* de găuri.

* Prin *Grand slam* se înțelege o combinație de patru diagrafii și anume: laterolog-8, inductivă 5FF40, inductivă 6FF40 și proximitilog

Pe lățimea benzii, pe lîngă șirurile *9* și *10*, se mai găsesc opt șiruri, notate de la *1* la *8*, și acestea reprezintă scara ohmică care poate fi 10 ohm · m, 20 ohm · m etc. Toată scara este împărțită în 255 părți astfel: șirul notat cu *8* reprezintă 1/255 din scara ohmică, șirul notat cu

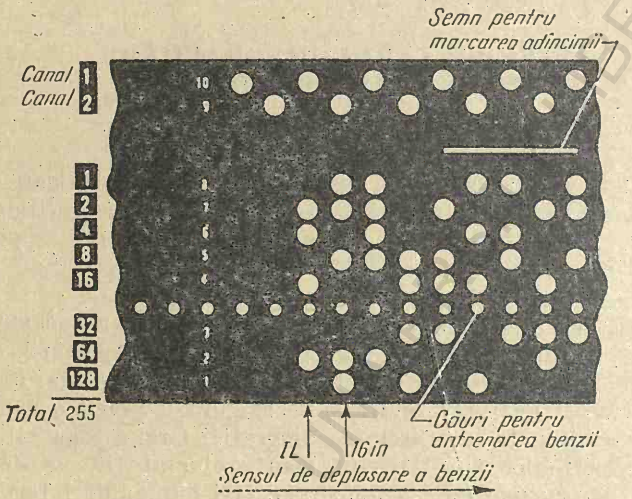


Fig. XVII.1. Exemplu de înregistrare pe bandă perforată.

7 reprezintă 2/255 din scara ohmică; șirul *6*=4/255; șirul *5*=8/255, șirul *4*=16/255, șirul *3*=32/255; șirul *2*=64/255 și șirul *1*=128/255.

De exemplu, pe banda din fig. XVII.1 se citesc pe canalul *1* (șirul *10*) valorile de rezistivitate transpuse după o digrafie inductivă înregistrată în scara de 20 ohm · m, astfel:

$$(64+16+4+2)\times 20/255=7 \text{ ohm} \cdot \text{m}$$

În același mod pe canalul *2* (șirul *9*) se citesc valorile de rezistivitate transpuse după o diagrafie înregistrată cu dispozitiv normal scurt 16 in, înregistrată de asemenea în scara de 20 ohm · m;

$$(128+64+8+2+1)\times 20/255=16 \text{ ohm} \cdot \text{m}.$$

Adîncimile sînt reprezentate pe bandă prin linii situate între șirurile *8* și *9*. Sfîrșitul liniei reprezintă notarea unei adîncimi, iar intervalul dintre două linii reprezintă 100 picioare. Adîncimile se scriu manual pe bandă. Pe un interval de 100 picioare se transcriu 200 informații pentru fiecare canal (*9* și *10*).

2. ÎNREGISTRAREA PE BANDĂ MAGNETICĂ

Pe banda magnetică utilizată de firma Schlumberger se pot înregistra 12 informaţii pe şapte şiruri; un asemenea ansamblu se numeşte *cadru* (v. fig. XVII.2).

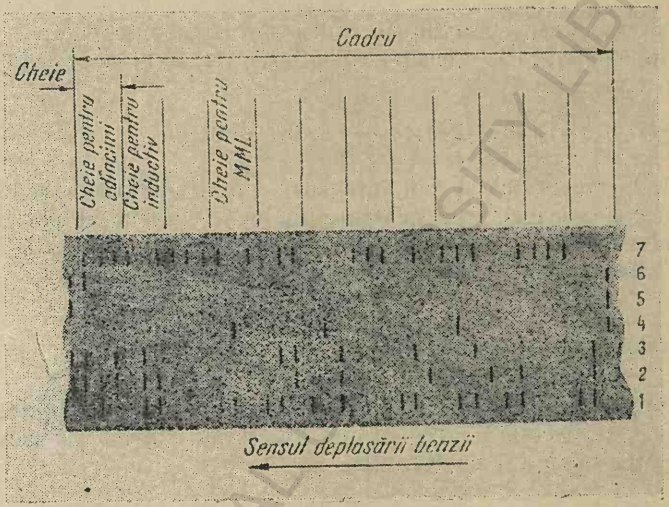


Fig. XVII.2. Exemplu de înregistrare pe bandă magnetică:
1, 2, 3, 4 — şiruri care servesc pentru transpunerea valorilor rezistivităţii; *5, 6* — şiruri pentru marcarea începutului şi sfîrşitului unui cadru; *7* — şir pentru controlul funcţionării dispozitivului.

Pe şirurile *1—4* ale cadrului se transpun valorile de pe diagrafii (inductive, laterolog, microlaterolog etc.). În cuprinsul unei douăsprezecimi din cadru se pot marca trei serii de semne pe fiecare şir, a căror semnificaţie (cheie) este:

şirul	4	8	128	2 048	
	3	4	64	1 024	total =4 095
	2	2	32	512	
	1	1	16	256	

Pe şirurile *5—6* se marchează începutul şi sfîrşitul cadrului, iar pe şirul *7* semnele pentru controlul funcţionării normale a dispozitivului.

Pe prima douăsprezecime din cadru se transpune adîncimea. Conform semnelor din fig. 20, adîncimea la care s-au transpus informaţiile de pe diagrafii este:

$$1+2+4+16+32+512+1\,024=1\,591 \text{ in}$$

Pe a doua douăsprezecime din cadru sînt transpuse valorile de rezistivitate după o diagrafie inductivă înregistrată în scara de 20 ohm · m și valoarea sa este:

$$(16+32+64+256+512)\times \frac{20}{4095} \approx 4{,}3 \text{ ohm} \cdot \text{m}$$

Pe a patra douăsprezecime din cadru sînt transpuse valorile de rezistivitate după o diagrafie microlaterolog înregistrată în scara de 20 ohm · m și valoarea sa este:

$$(16+128)\times \frac{20}{4\ 095} \approx 0{,}7 \text{ ohm} \cdot \text{m}.$$

Pe banda magnetică se pot înregistra simultan 6 serii de informații (din care una este rezervată pentru adîncimi). Ulterior se pot înregistra încă 6 informații. Pe o bandă de 200 m se pot transpune datele după diagrafii reprezentînd 6 000 m de gaură investigată.

3. EXEMPLE DE INTERPRETARE.

Determinarea porozității $\varnothing$, a lui ρ_{wa} și $F_{16''}/F_s$. Pentru determinarea porozității este necesară înregistrarea diagrafiei sonice, din care se calculează porozitatea $\varnothing_s$ cu formula:

$$\varnothing_s = 100\frac{(\Delta t - \Delta t_m)}{c \cdot \Delta t_{arg} \cdot (\Delta t_f - \Delta t_m)} \qquad \text{(XVII.1)}$$

în care c este un coeficient care se determină experimental.

În relația XVII.1, Δt_m, Δt_f și $c\Delta t_{arg}$ se consideră constante. Pentru calcularea lui F_s se utilizează relația

$$F_s = 0{,}62/\varnothing^{2{,}15} \qquad \text{(XVII.2)}$$

Pentru calcularea raportului $F_{16''}/F_s$ este necesar să se cunoască $\rho_{16''}$ care se preia după diagrafia înregistrată cu dispozitiv normal scurt 16 in. Cunoscîndu-se $\rho_{16''}$ se calculează raportul $F_{16''}/F_s$, cu relația

$$F_{16''}/F_s = \rho_{16''}/\rho_f \cdot F_s \qquad \text{(XVII.3)}$$

Rezistivitatea filtratului ρ_f pe o porțiune din gaura de sondă se consideră constantă.

Pentru calcularea lui ρ_{wa} se folosește raportul:

$$\rho_{wa} = \rho_{IL}/F_s \qquad \text{(XVII.4)}$$

Rezistivitatea ρ_{IL} se preia după diagrafia inductivă.

Schema utilizată pentru calcularea porozității $\varnothing_s$ a lui ρ_{wa} și a raportului F_{16}''/F_s este redată în fig. XVII.3.

În prima fază se înregistrează, pe film, diagrafia inductivă și diagrafia înregistrată cu dispozitiv normal scurt 16″ și se transpun pe o bandă perforată datele de rezistivitate ρ_{IL} și ρ_{16}''.

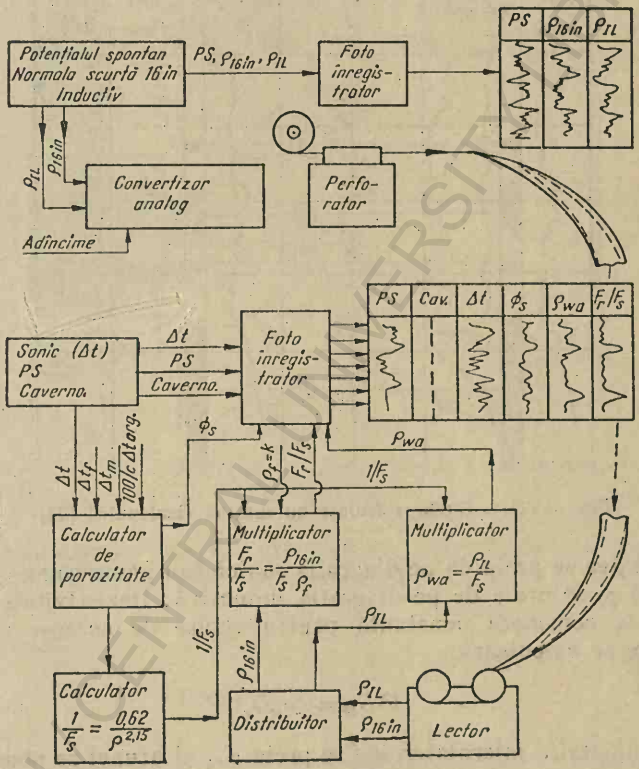


Fig. XVII.3. Schemă pentru calcularea porozității $\varnothing_s$, a lui ρ_{wa} și a raportului F_{16}''/F_s utilizînd mașini electronice de calcul.

În faza a doua se înregistrează diagrafia sonică, potențialul spontan și cavernometria. După diagrafia sonică se preia Δt, care se înregistrează pe o bandă magnetică. Prelucrarea datelor după banda perforată înregistrată în prima fază și a datelor după banda magnetică este prezentată schematic în fig. XVII.3. În fig. XVII.4 se prezintă diagrafia curbelor calculate.

Calcularea indicelui de recuperare a hidrocarburilor. Acest indice se calculează cu relaţia:

$$\varnothing(S_H - S_{Hr}) = \varnothing(S_{xo} - S_w) = \sqrt{\rho_f/\rho_{xo}} - \sqrt{\rho_w/\rho_r} \qquad \text{(XVII.5)}$$

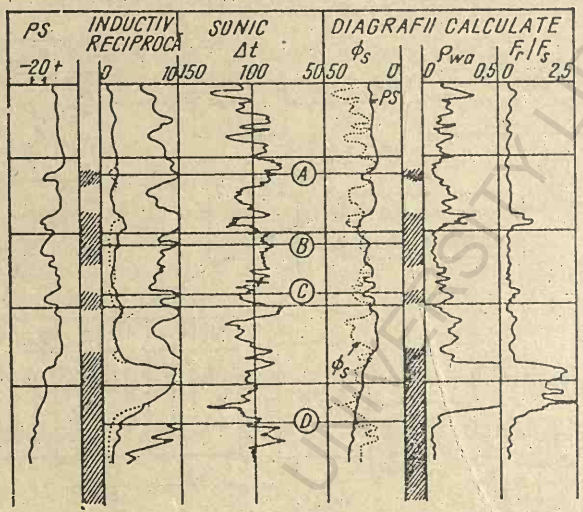


Fig. XVII.4. Curbe calculate cu maşină electronică [21]

Porozitatea se preia de pe diagrafia sonică sau gama-gama. Rezistivitatea reală ρ_r se preia de pe diagrafia inductivă. Rezistivitatea apei de zăcămînt se consideră constantă pentru strate de aceeaşi vîrstă. Cu aceste date se calculează:

$$\varnothing S_w = \sqrt{\rho_w/\rho_r} \qquad \text{(XVII.6)}$$

De pe diagrafia microlaterolog se preia ρ_{x0} şi atunci se poate calcula

$$\varnothing S_{x0} = \sqrt{\rho_f/\rho_{0x}} \qquad \text{(XVII.7)}$$

(ρ_f se consideră constant pe o anumită porţiune din gaura sondei.

Prin efectuarea diferenţei valorilor rezultate din relaţiile XVII.6 şi 7 se obţine direct indicele de recuperare a hidrocarburilor sub formă de diagramă, după cum este prezentat în fig. XVII.5.

În concluzie, se menţionează avantajele folosirii maşinilor de calcul electronice pentru interpretarea diagrafiilor: se reduce considerabil timpul pentru interpretare; datele prelucrate de maşină se redau sub

formă de diagrafie; datele obținute nu sînt afectate de erori. În cazul transmiterii datelor înregistrate în gaura de sondă prin radio, acestea pot fi recepționate și prelucrate de un centru de calcul și retransmise la beneficiar tot prin radio și imprimate în prima fază pe bandă magnetică și ulterior reproduse sub formă de diagramă.

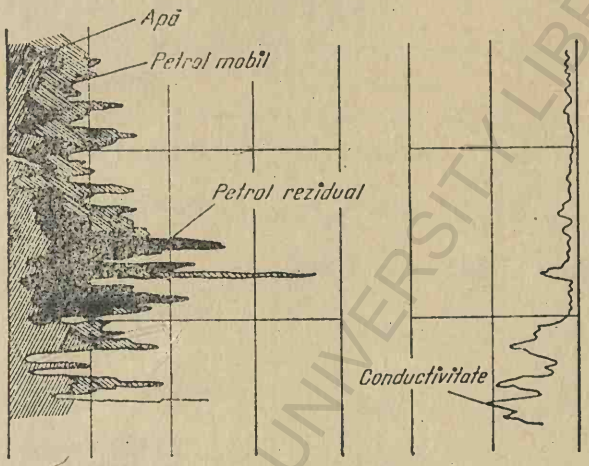


Fig. XVII.5. Diagrafie care redă indicele de recuperare a hidrocarburilor.

Date suplimentare despre interpretarea diagrafiilor cu mașini electronice se găsesc în literatura de specialitate [2, 3]].

BIBLIOGRAFIE

1. B l o c h, M. **Calcul automatic.** Revue de l'industrie minerale. 15 decembrie 1967.
2. M o r a n, J. H. *A* **progress raport an machine. Interpretation of Well log.** SPWLA Annual Meeting, May 1962, Houston, Texas.
3. D e s b r a n d e s, R. **Curs de diagraphies,** 1967.

Col. Șan. 24, Sole

Bun de tipar: 22.11.1969. Coli de tipar: 25,75. C. Z. 551(018).

Întreprinderea poligrafică Sibiu, str. N. Bălcescu Nr. 17

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

ERATĂ

Pagina	Rîndul	In loc de	Sa va citi
135	formula (VI.4)	$=1\ \varnothing^2$	$=1/\varnothing^2$
221	formula (XI.7)	$I=I_0e^{-(\mu+\tau)X}=I_0e^{-\tau X}$	$I=I_0e^{-(\mu+\sigma)X}=I_0e^{-\tau X}$
331	4 de_jos	Dacă $\rho_{IL}=\rho$, atunci	Dacă $\rho_{IL}=\rho_0$, atunci
351	formula (XVI.46), la numărător	$\varnothing_m$	$\varnothing_{vm}$
355	formula (XVI.56)	ρ^m	ρ_w
355	formula (XVI.57), la numărător	$(1-v)\varnothing_t$	$1-v\varnothing_t$

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY